



Marisa Alexandra Oliveira Amaral

Licenciada em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Estudo, desenvolvimento e controlo de grupo gerador pico-hídrico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins
FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Anabela Gonçalves Pronto

Arguentes: Prof. Doutor Luís Brito Palma

Vogal: Mestre Pedro Peixoto de Magalhães

Prof. Doutor João Alves Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2013

Estudo, desenvolvimento e controlo de grupo gerador pico-hídrico

Copyright © Marisa Alexandra Oliveira Amaral, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais

À minha irmã

Ao Zé

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor João Martins e ao Engenheiro Pedro Magalhães pelo apoio na realização deste projecto.

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e em especial aos Professores com quem me cruzei ao longo deste meu percurso académico. Juntos asseguraram a formação que daqui levo e a confiança necessária para encarar o próximo ciclo que se avinda.

Aos meus amigos mais presentes e aos mais distantes, que me apoiaram, aconselharam, incentivaram e sempre que precisei estiveram ao meu lado. Aos meus colegas e amigos de curso que partilharam comigo esta jornada académica, cheia de emoções, sacrifícios e momentos de entreajuda. Para todos os que compartilharam e acompanharam a vivência deste trabalho, expresso também a minha gratidão.

Ao José Vieira, pela enorme paciência, compreensão, apoio, motivação, afecto, entreajuda e companheirismo que sempre me dedicou ao longo deste percurso. Juntos conseguimos esta vitória na nossa vida pessoal e académica. Aproveito aqui também para agradecer aos pais do Zé pelo apoio e carinho que sempre demonstraram para comigo.

Um agradecimento muito sentido aos meus pais Francisco e Anabela Amaral, pelo apoio e compreensão inestimáveis e pelos valores que me transmitiram ao longo da vida. Também pelos diversos sacrifícios suportados e constante encorajamento a fim de prosseguir o meu percurso académico, culminando na elaboração deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha irmã, Fisioterapeuta Carolina Amaral, pela paciência, amizade e disponibilidade que sempre teve comigo. Por tudo o que passámos juntas, não só enquanto partilhámos a nossa vida académica mas desde sempre.

A todos os restantes familiares pela simpatia e preocupação que demonstraram, não esquecendo os que partiram mas que não esquecerei.

A todos os que de alguma forma contribuíram na realização deste percurso. O meu sincero Obrigada.

Resumo

Actualmente a energia eléctrica apresenta-se como um factor bastante limitativo no desenvolvimento socioeconómico das populações. Satisfazer as necessidades da procura energética no momento e no local em que esta é necessária é um dos desafios com que a sociedade tem sido confrontada no último século.

O actual modelo de produção energética é insustentável a médio longo prazo, começando-se cada vez mais a ouvir falar numa possível crise energética. Isto deve-se principalmente à crescente escassez dos combustíveis fósseis e à destruição ambiental aliada ao uso destes combustíveis. Sem fontes de energia acessíveis a nível económico e menos prejudiciais para o meio ambiente poderá ser difícil manter a cobertura energética actual.

Numa perspectiva a curto e médio prazo, a aposta na produção descentralizada de energia recorrendo ao uso de fontes renováveis, em conjunto com uma mudança de comportamentos e mentalidades das populações, parece ser a solução mais viável para travar a actual crise energética.

A produção de energia através de fontes renováveis é uma alternativa viável, que começa a ser colocada em prática em pequenas instalações. No entanto, devido ao carácter flutuante das energias renováveis como a solar e a eólica surgem limitações de produção, que podem tornar-se desvantajosas para o utilizador. Isto leva à procura de novas tecnologias de produção e armazenamento de energias renováveis.

Propõe-se um sistema de produção e armazenamento de energia, de pequena escala, integrado em edifícios, com o objectivo de combater o efeito do carácter flutuante das fontes de energia renováveis. A energia produzida em excesso por fontes renováveis associadas ao edifício é armazenada, sob a forma de energia potencial, num depósito de água colocado na cota superior do edifício. Quando os recursos renováveis não se encontram disponíveis, a produção de energia efectua-se escoando a água do reservatório superior até outro inferior, passando por uma turbina hídrica, que por sua vez acciona um gerador eléctrico, produzindo energia. Para avaliar o desempenho do sistema proposto efectuou-se uma análise em ambiente de simulação e outra em laboratório.

Palavras-chave: produção de energia renovável, geração de energia pico-hídrica, armazenamento de energia, produção descentralizada

Abstract

Nowadays electric energy presents itself as a limitative factor in the socioeconomic development of the populations. Satisfying the needs of the energy demand on time and in the place in which it is needed, is one of the challenges that society has been confronted over the last century.

The current energy production model is unsustainable in a medium-long run, more and more an energetic crisis is talked as possible. This is mainly due to the growing lack of fossil fuels and to environmental destruction allied itself with the used of these fuels. Without energy sources accessible at an economic level and less hazardous to the environment, it will be hard to sustain the current energetic coverage.

In a short to medium perspective, betting in a decentralized energy production, resorting to the use of renewable sources, together with a change in behaviors and mentalities of the general population, seems to be the most viable solution to top the current energy crisis.

The production of energy through the renewable methods is a viable alternative, that begins to be put into practice in small applications. However, due to the fluctuating characteristic of renewable sources, like solar and wind power, emerge limitations in production that may become disadvantageous for the end user. This leads for the search of new technologies of production and storage of renewable energies.

In this thesis it is proposed a small-scale production and storage energy system, integrated with buildings. The excess energy that is produced to the building from renewable sources is stored under potential energy, in a water deposit placed in the top of the building. When the renewable resources are not available, the energy production is done by draining the water in the reservoir, making it go through a pico turbine, which drives an electric generator.

Keywords: renewable energy production, pico-hydro energy generation, energy storage, decentralized production

Índice de Matérias

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Enquadramento	1
1.2 – Motivação	4
1.3 – Objectivos	7
1.4 – Estrutura	8
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE.....	11
2.1 - Produção de energia pico-hídrica	11
2.1.1 - Produção de energia pico-hídrica nos países em desenvolvimento	11
2.1.2 - Produção de energia pico-hídrica nos países desenvolvidos	14
2.2 - Bombagem de água recorrendo a energias renováveis	14
2.3 – Sistemas de armazenamento e produção de energia pico-hídrica integrada em edifícios	18
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO GLOBAL DO SISTEMA PROPOSTO	21
3.1 – Sistema de produção e armazenamento de energia proposto	21
3.2 - Classificação hidroeléctrica	25
3.3 - Opções tecnológicas.....	27
3.3.1 - Turbinas hídricas	27
3.3.2 - Gerador eléctrico	31
CAPÍTULO 4 - MODELAÇÃO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO E PRODUÇÃO DE ENERGIA PICO-HÍDRICA	33
4.1 – Modelação do sistema de produção pico-hídrica	33
4.1.1 – Modelo analítico da turbina <i>Pelton</i>	35
4.1.2 – Modelo analítico do gerador de corrente contínua	39
4.1.3 – Validação do sistema de produção pico-hídrica	43

4.1.3.1 - Modelo de simulação do sistema de produção pico-hídrica	44
4.1.3.2 - Resultados de simulação do sistema de produção pico-hídrica	46
4.2 – Modelação do sistema de armazenamento hídrico	54
4.2.1 – Funcionamento da bomba centrífuga.....	55
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	57
5.1 – Instalação experimental do sistema de produção e armazenamento pico-hídrico	57
5.1.1 - Caudalímetro	60
5.1.2 – Transdutores de pressão.....	61
5.1.3 – Taquímetro da bomba centrífuga	62
5.1.4 – Taquímetro do grupo turbina-gerador.....	63
5.1.5 – Aquisição de dados dos sensores.....	65
5.2 – Análise experimental do sistema de armazenamento de energia.....	66
5.3 – Análise experimental do sistema de produção energia	72
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	79
6.1 - Conclusões.....	79
6.2 - Trabalho futuro.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Consumo final de energia por sector económico (em Mtep ⁰) até 2030 (adaptado de [10]).	5
Figura 1.2 – Constituição do sistema de armazenamento e produção de energia proposto.	7
Figura 2.1 – a) Canal de água de madeira que leva água à turbina, b) Instalação pico-hídrica, c) Iluminação de uma habitação (adaptado de [36]).	12
Figura 2.2 - Grupo turina-gerador (adaptado de [36]).	13
Figura 2.3 – Sistema fotovoltaico de bombeamento e armazenamento de água (adaptado de [39]).	15
Figura 2.4 - Esquemático do sistema PV de bombagem de água (adaptado de [40]).	16
Figura 2.5 – Sistema de bombagem convencional constituído por uma turbina eólica electricamente acoplada a uma bomba centrífuga (adaptado de [44]).	17
Figura 2.6 - Princípio de funcionamento de um sistema híbrido que integra energia hídrica e eólica: WG – Gerador eólico; P – Bomba de água; HG – Gerador hídrico; EP – Painelelctrico; SU – Unidade supervisora (adaptado de [48]).	19
Figura 2.7 – Esquema experimental utilizado para avaliar a integração de produção pico-hídrica em edifícios, numa cidade do Bangladesh (adaptada de [49]).	20
Figura 3.1 - Esquema de funcionamento global do sistema de produção e armazenamento proposto.	23
Figura 3.2 - Esquema de produção hídrica com bombeamento recorrendo a energias renováveis. (adaptado de [28]).	24
Figura 3.3 - Classificação hidroelctrica quanto à potência (adaptado de [23]).	26
Figura 3.4 - a) Turbina tipo <i>Pelton</i> b) Turbina tipo <i>Crossflow</i> c) Turbina tipo <i>Turgo</i> d) Turbina tipo <i>Kaplan</i> e) Turbina tipo <i>Francis</i> (adaptado de [30]).	29
Figura 3.5 - Tabela gráfica para selecção de turbinas em função do caudal, queda e potência do sistema (adaptado de [24]).	30
Figura 3.6 - Curvas típicas de eficiência de turbinas hídricas (adaptado de [50]).	31
Figura 4.1 – Esquema do sistema de produção de energia.	33

Figura 4.2– a) Esquema simplificado de uma turbina <i>Pelton</i> comum b) Detalhe da incidência do jacto de água sobre a pá (adaptada de [51]).	36
Figura 4.3 - Esquema da máquina CC de magnetos permanentes.	40
Figura 4.4 - Modelo de um gerador CC de magnetos permanentes.	41
Figura 4.5 - Transformações de energia na conversão hidroelétrica.	43
Figura 4.6 – Modelo de simulação utilizado na validação do sistema de produção, construído em Simulink®.	45
Figura 4.7 – Gráfico que representa a curva de eficiência da turbina Pelton com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.	47
Figura 4.8 – Gráfico que representa a curva de eficiência do sistema do gerador com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.	48
Figura 4.9 – Gráfico que representa a curva de eficiência do sistema de produção pico-hídrica com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.	49
Figura 4.10 – Gráfico que representa a curva de variação da potência na carga do sistema com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.	50
Figura 4.11 – Esquema hidráulico que permite determinar o caudal que flui na canalização.	51
Figura 4.12 - Curva de eficiência do sistema de produção para o caudal de 7,5 <i>ls</i> – 1.	53
Figura 4.13 – Variação da potência de carga com a variação do ângulo θ .	53
Figura 4.14 – Esquema do sistema de armazenamento de energia.	54
Figura 4.15 – Curva característica P-Q teórica de uma bomba centrífuga (adaptado de [27]).	55
Figura 4.16 – Variação da curva P-Q de uma bomba com a variação da velocidade de rotação (adaptado de [9]).	56
Figura 5.1 - Esquemático do modelo experimental de produção e armazenamento de energia pico-hídrica.	58
Figura 5.2 - Instalação experimental do sistema pico-hídrico	59
Figura 5.3 - a) Caudalímetro digital utilizado na instalação. b) Caudalímetro analógico utilizado na instalação.	60
Figura 5.4 - Transdutores de pressão utilizados na instalação.	61

Figura 5.5 - Circuito eléctrico do taquímetro da bomba.....	62
Figura 5.6 – Disco do taquímetro da bomba centrífuga.	63
Figura 5.7 – a) Esquema de funcionamento do taquímetro do conjunto turbina-gerador. b) Taquímetro do conjunto turbina-gerador na instalação.	64
Figura 5.8 - Arduino Mega 2560 (vista de cima). [4]	65
Figura 5.9 – Esquema simplificado da recolha dos dados experimentais do sistema de bombagem.	67
Figura 5.10 – Variação da velocidade de rotação da bomba com o caudal.....	68
Figura 5.11 – Curva P-Q da bomba centrífuga utilizada no Setup experimental.....	69
Figura 5.12 – Potência hidráulica da bomba centrífuga utilizada no Setup experimental	70
Figura 5.13 – Eficiência da bomba centrífuga utilizada no Setup experimental.....	71
Figura 5.14 – Turbina <i>Pelton</i> acoplada ao motor universal, funcionando como gerado, utilizados no <i>Setup</i> experimental.....	72
Figura 5.15 – Esquema simplificado da recolha dos dados experimentais do sistema de bombagem.	73
Figura 5.16 – Velocidade de rotação do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de resistência constante.....	74
Figura 5.17 – Potência na carga resistiva do grupo turbina-gerador pico-hídrico, para um valor de resistência constante.	75
Figura 5.18 – Eficiência do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de resistência constante.	76
Figura 5.19 – Potência na carga resistiva do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de caudal constante.	77
Figura 5.20 – Eficiência do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de caudal constante.....	78

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Turbinas de acção e reacção aplicáveis em aproveitamentos hidroeléctricos. [52]	28
Tabela 5.1 – Tabela resuma as características dos sensores.	64

Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
P_{in}	Potência instalada	W
ρ	Densidade da água	kgm^{-3}
g	Aceleração da gravidade	$9,81\ ms^{-2}$
H	Queda de água útil	m
Q	Caudal de água	m^3s^{-1}
ω	Velocidade angular	$rads^{-1}$
v_j	Velocidade linear do jacto de água	ms^{-1}
R	Raio da turbina	m
\vec{T}	Binário do sistema	$N.m$
\vec{H}	Momento angular	kgm^2s^{-1}
v_p	Velocidade linear das pás da turbina	ms^{-1}
θ	Ângulo com que o jacto de água abandona a pá	rad
$f.e.m$	Força electromotriz induzida	V
e	Força electromotriz da máquina CC	V
R_a	Resistência dos enrolamentos da armadura	Ω
L_a	Indutância dos enrolamentos da armadura	H
k_T	Constante de binário da máquina CC	$N.mA^{-1}$
T_L	Binário mecânico	$N.m$

T_e	Binário electromagnético	$N.m$
J	Momento de inércia	Kgm^2
B	Atrito viscoso	$B.m.s$
P_A	Pressão no ponto A	Pa
P_B	Pressão no ponto B	Pa
γ	Peso específico da água	Nm^{-3}
v_A	Velocidade da água no ponto A	ms^{-1}
v_B	Velocidade da água no ponto B	ms^{-1}
h_A	Altura do ponto A	m
h_B	Altura do ponto B	m
h_f	Perda de carga entre A e B	m
L	Comprimento da canalização	m
D	Diâmetro da canalização	m
b	Coeficiente de <i>Flamant</i>	-

Siglas

RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
PHS	<i>Pumped hydro storage</i>
OCDE	Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico
NZEB	Edifícios Próximos da Energia Zero
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
GMP	Gerador de magnetos permanentes
S.C	Superfície de controlo
V.C	Volume de controlo
ICSP	<i>In Circuit Serial Programming</i>

Capítulo 1 - Introdução

A crescente necessidade energética verificada na actualidade, em paralelo com as condicionantes ambientais que lhe estão associadas, tem impulsionado alguns estudos e desenvolvimentos ligados ao ramo energético. Um dos estímulos mais relevantes nesta área tem sido a identificação de tecnologias que permitam o desenvolvimento de formas de produção de energia eléctrica, capazes de satisfazer as necessidades do consumidor final, de modo a poderem apresentar-se como sistemas alternativos à produção de energia a partir de combustíveis de fósseis.

As condicionantes ambientais e a dependência energética associadas às principais fontes de produção de energia da actualidade fazem emergir alternativas que apontam no sentido da produção renovável.

A principal desvantagem das fontes renováveis, como o sol e o vento, é o facto de serem fontes imprevisíveis, necessitando sempre de ser associadas a tecnologia de armazenamento energético.

Para tal, apresenta-se um sistema integrado em edifícios que pretende armazenar, sob a forma de energia potencial da água, a energia produzida em excesso por fontes renováveis, como o sol e o vento. Para que quando o recurso natural associado a essas fontes renováveis não se encontre disponível, seja possível garantir a produção de energia recorrendo aos conceitos da produção hídrica, utilizando a água armazenada na cota superior do edifício.

1.1 – Enquadramento

O desenvolvimento sócio-económico da humanidade e o aumento global da população têm contribuído para o aumento, a um ritmo significativo, do consumo de energia. Em [1], a organização *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook* prevê que, até 2030, exista um crescimento anual médio de 1,8% no consumo de energia primária. Este crescimento resulta, maioritariamente, no consumo de energias de origem fóssil ao longo dos próximos 30 anos, o que leva a um aumento, não desejável, da emissão de gases poluentes para a atmosfera.

A crescente escassez nas reservas de combustíveis fósseis e a degradação do meio ambiente encontram-se entre os principais problemas encarados pela sociedade moderna. A

evolução do Homem a nível social, económico e tecnológico, está bastante relacionada com a utilização destes combustíveis, no entanto, o seu uso indiscriminado tem levado o planeta a uma crescente crise ambiental. [2]

Esta questão possui uma natureza complexa, pois se por um lado se verifica a necessidade de redução no consumo de combustíveis fósseis, por outro o ser humano está cada vez mais dependente da energia eléctrica. Portugal é ainda um país que faz pouco uso dos recursos energéticos próprios, nomeadamente, aqueles que actualmente asseguram a maioria das necessidades energéticas como o petróleo, o carvão e o gás natural. Esta situação de escassez traduz-se numa elevada dependência energética do exterior, que segundo a Direcção Geral de Energia e Geologia, foi da ordem dos 77,1% em 2011. [3]

Esta dependência coloca Portugal numa situação fragilizada que se reflecte no valor da factura energética, implicando custos evidentes para a sociedade, mostrando a necessidade de apostar em novas alternativas de produção de energia, nomeadamente recorrendo ao uso de energias renováveis.

Numa perspectiva a curto e médio prazo, a aposta na produção e armazenamento descentralizados de energia pode ser a chave para o desenvolvimento de um paradigma energético mais sustentável, permitindo assim fornecer possíveis soluções para uma série de problemas sócio - económicos da actualidade. Esta solução apresenta uma das abordagens mais eficazes para a electrificação de áreas remotas e pode trazer vantagens em termos da diminuição de emissões de gases perigosos, eficiência energética e redução de custos de transporte, colocando esta alternativa na vanguarda das soluções para assegurar a produção de energia no futuro. [5]

Apesar de não ser consensual, a produção descentralizada define-se como uma forma de produção de energia eléctrica instalada nas proximidades do consumidor, que pode ou não ser conectada com a rede de distribuição eléctrica. A produção descentralizada não implica a necessidade de utilização de energias renováveis, no entanto, conjugando os dois factores podem encontrar-se alternativas viáveis para uma estratégia energética mais sustentável. A produção descentralizada com base em tecnologias renováveis como a solar, eólica, hídrica e biomassa está a tornar-se uma opção relevante nos sistemas de geração de energia futuros. [6, 7]

O uso de energias renováveis permite descentralizar a produção de energia, com base nos recursos energéticos naturais existentes nos diferentes locais e perto das diferentes zonas de consumo, algumas delas inacessíveis à rede de distribuição. A chave para o uso de recursos renováveis é que eles são repostos pela natureza e além disso, têm a vantagem de ser “amigos” do ambiente. No entanto, do ponto de vista dos sistemas de distribuição de energia a principal preocupação é garantir a entrega da energia quando esta é requerida pelo consumidor.

No que diz respeito à capacidade de resposta à procura, os recursos renováveis podem dividir-se em duas categorias: acumulável (*dispatchable*) e não-acumulável (*non-dispatchable*). [8, 12]

Os recursos naturais denominados acumuláveis, como a biomassa e a hídrica, são recursos que estão sempre disponíveis, podendo então ser solicitados a qualquer altura para produzir energia. Por outro lado, os recursos não-acumuláveis, não permitem o controlo da energia que produzem, podendo estar ou não acessíveis no momento da procura. [12]

As fontes de energia solar e eólica além de serem as fontes renováveis mais exploradas actualmente têm particularidades que outros recursos não possuem. Para além de serem utilizadas como grandes fornecedores de energia para a rede eléctrica, estas tecnologias são, a cada dia que passa, um recurso energético indispensável nos edifícios e habitações, funcionando como um excelente complemento no abastecimento de energia. [13, 14]

No entanto, tanto a energia solar como a eólica são classificadas como recursos não-acumuláveis, pois estão dependentes das condições ambientais e a produção de energia flutua independentemente das necessidades dos consumidores. Assim, a solução mais viável, que permita controlar a produção e garantir a segurança no sistema de abastecimento energético, passa pelo armazenamento da energia à medida que esta se encontra disponível. [12]

O armazenamento de energia é uma componente fundamental neste novo paradigma de sustentabilidade, muito baseado em renováveis, já que permite resolver a sua principal lacuna - o seu elevado grau de intermitência. Com um sistema de armazenamento é possível armazenar a energia nas horas de vazio, para posteriormente ser aproveitada nas horas de pico de utilização, quando os recursos naturais não se encontram disponíveis. [14]

Infelizmente, a electricidade raramente pode ser armazenada em grandes quantidades e tem sempre de ser convertida noutras formas, tais como, química, mecânica, potencial ou em energia térmica, para posteriormente ser reconvertida em electricidade. [14]

1.2 – Motivação

Ao longo dos últimos anos tem-se verificado a necessidade de otimizar o consumo de energia. Esta preocupação deve-se não só à preocupante dependência energética nacional e mundial, em relação aos cada vez mais escassos combustíveis fósseis, mas também aos compromissos internacionais que promovem a redução das emissões de gases poluentes que provocam o efeito de estufa. Estas questões ambientais e ainda a eficiência energética, associadas ao consumo de energia, especialmente nos edifícios, são factores a ter em consideração para o desenvolvimento económico e sustentável do país.

A busca de novas tecnologias de produção e armazenamento de energia que tornem os sistemas independentes da rede eléctrica é uma das motivações para a realização desta dissertação.

O consumo de energia nos sectores doméstico e terciário é especialmente elevado nos países desenvolvidos (ver Figura 1.1), verificando-se assim um elevado potencial de poupança energética nesses sectores. No entanto, para se conseguir uma redução no consumo de energia é necessária a implementação de tecnologias inovadoras em conjunto com a aplicação dos métodos de eficiência energética já conhecidos.

A tendência das políticas de geração energética recentemente tem-se alterado substancialmente. Procura-se cada vez mais evitar a produção de energia eléctrica em grandes centrais, tentando praticar-se uma geração distribuída. A integração de fontes de geração de energia renovável em edifícios, habitações e locais remotos faz parte da política de geração descentralizada, e permite garantir uma maior sustentabilidade energética, ao não se depender tanto da utilização da rede eléctrica, como nos moldes actuais. [10]

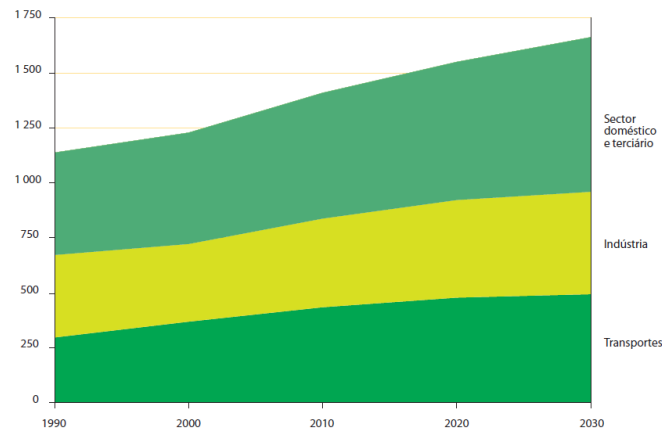


Figura 1.1 - Consumo final de energia por sector económico (em Mtep ⁽¹⁾) até 2030 (adaptado de [10]).

A aplicação do conceito de produção descentralizada em sistemas integrados em edifícios é de grande interesse, no sentido em que os edifícios são responsáveis por uma elevada percentagem do consumo de energia, atingindo, por exemplo, cerca de 30% do consumo da energia final em 2007. [11] A produção descentralizada também apresenta soluções que permitem satisfazer as várias necessidades energéticas de um edifício, tanto térmicas como eléctricas.

Corroborando esta situação, Portugal tem feito apostas e criado legislação de apoio à produção energética recorrendo a fontes renováveis em edifícios e habitações. Estabeleceu o Decreto-Lei 80/2006, de 4 de Abril, que aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este impõe limites aos consumos energéticos para climatização e produção de águas quentes em edifícios e habitações, num claro incentivo à utilização de sistemas eficientes e de fontes energéticas renováveis.

Esta legislação impõe a instalação de painéis solares térmicos e valoriza a utilização de outras fontes de energia renovável, uma vez que declara que em *“alternativa à utilização de colectores solares térmicos podem ser utilizadas quaisquer outras formas renováveis de energia que captem, numa base anual, energia equivalente à dos colectores solares, podendo ser esta utilizada para outros fins que não a do aquecimento de água se tal for mais eficiente ou conveniente”*. [9]

⁽¹⁾ Mtep: milhões de toneladas equivalentes de petróleo.

A integração de sistemas de produção de energia renováveis em edifícios é uma medida bastante plausível no contexto energético actual, devendo ser encarada como uma estratégia para o aumento da eficiência energética nos edifícios. Esta alternativa revela-se interessante, no sentido que permite eliminar as perdas por transmissão e distribuição da convencional produção centralizada. De facto, a produção renovável vem-se encaixando, nos últimos anos, no ambiente urbano, não só para uso doméstico, mas também para edifícios comerciais e industriais, apoiando a produção descentralizada de pequena escala. [10]

A instabilidade de produção, que ainda torna desfavorável o recurso a fontes renováveis em comparação com os recursos fósseis, torna evidente a oportunidade de potenciar o armazenamento da energia eléctrica, como um método eficaz para ultrapassar as intermitências de alguns recursos. A intermitência dos recursos renováveis não garante a disponibilidade energética característica das tecnologias de produção que recorrem ao uso dos recursos fósseis. Tanto a energia eólica, como a energia solar, estão totalmente dependentes das condições climáticas existentes no meio em que estão inseridas. [17]

As necessidades energéticas são cada vez maiores e conseqüentemente a procura de energia não pára de crescer, levando a um franco desenvolvimento das tecnologias de armazenamento, de modo a se conseguirem soluções mais confiáveis e com um desempenho adequado às necessidades requeridas. Só assim, é possível melhorar o balanço entre a procura e a oferta, facilitando a introdução dos recursos renováveis na rede de distribuição de energia eléctrica.

A implementação, em pequena escala, de sistemas de energia renovável na forma de micro-turbinas eólicas ou instalações fotovoltaicas, em conjunto com sistemas de armazenamento habilitam a capacidade de fornecer energia a edifícios comerciais e/ou habitacionais. O armazenamento da energia permite que esta seja guardada à medida que se encontra disponível, convertendo-se noutra forma de energia tal como potencial, mecânica, térmica ou química. [14]

Actualmente existe uma vasta gama de tecnologias com suporte mecânico, electroquímico e físico, para armazenar energia eléctrica, fornecendo um espectro de armazenamento com diferentes capacidades e para ambientes de diferentes escalas. Um factor crítico para a construção de um módulo adicional de armazenamento é o seu desempenho económico em comparação com outras alternativas tecnológicas. Quando se tentam identificar as soluções mais acertadas, no que diz respeito ao armazenamento, é

necessário considerar parâmetros relevantes, tais como: custo, duração, confiança, tamanho, capacidade de armazenamento e impacto ambiental. [15, 16]

Como abordado ao longo deste capítulo, uma forma de conseguir independência da rede eléctrica é a utilização de fontes de energia renováveis não-despacháveis, como o sol e o vento. Também a possibilidade de armazenar a energia proveniente dessas fontes e que não está a ser utilizada no momento, é outra das motivações. Assim, a energia produzida que não é utilizada no momento da produção pode ser armazenada para posterior utilização, o que evita o desperdício da mesma. No entanto, o armazenamento de energia renovável de pequena escala é ainda um processo em desenvolvimento, por vezes difícil e dispendioso.

1.3 – Objectivos

Tendo em conta toda a problemática referida, a presente dissertação tem como principal objectivo a apresentação de uma solução de armazenamento e produção de energia renovável, que acompanhe a mudança do paradigma energético actual, onde se torna cada vez mais evidente a aposta nas energias renováveis como alternativa aos escassos e consequentemente caros combustíveis fósseis.

Para tal, apresenta-se uma solução de armazenamento e produção descentralizada integrada num edifício, que recorre aos conceitos da produção hídrica convencional para gerar energia, à pequena escala.

O sistema proposto é constituído por um sistema de bombagem de água alimentado pelas fontes de energia renováveis do edifício, e por um sistema de produção de energia constituído por uma turbina hídrica e um gerador eléctrico. (ver Figura 1.2)

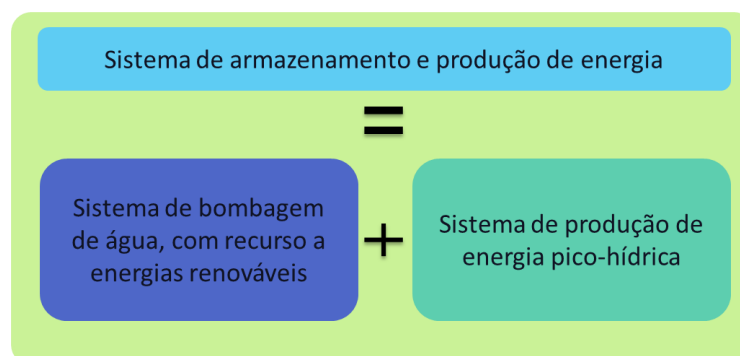


Figura 1.2 – Constituição do sistema de armazenamento e produção de energia proposto.

O sistema de bombagem de água permite armazenar a água no topo do edifício, armazenando-se assim a energia produzida em excesso por fontes renováveis integradas no edifício, como o sol e o vento.

O segundo utiliza a água armazenada, para accionar a turbina que se encontra acoplada ao gerador eléctrico, permitindo a produção de energia recorrendo aos princípios da produção hídrica convencional.

Este sistema é denominado, para a escala que se pretende implementar, sistema de armazenamento e produção pico-hídrica, uma vez que a potência que se espera produzir, a esta escala, não deverá ultrapassar os 5kW.

Ao longo desta dissertação pretendem atingir-se objectivos mais específicos como:

- Dimensionamento do sistema de produção;
 - Selecção da turbina pico-hídrica;
 - Selecção da máquina eléctrica a utilizar como gerador;
- Análise em modo de simulação e implementação experimental do sistema de bombagem e produção;
- Interpretação dos resultados;
- Averiguar potencialidades do sistema proposto.

1.4 – Estrutura

Este documento encontra-se subdividido em 6 capítulos.

Capítulo 1 – Introdução ao trabalho desenvolvido, nomeadamente, as motivações para o seu desenvolvimento e os objectivos que se pretendem alcançar.

Capítulo 2 – Estado da arte sobre a produção de energia pico-hídrica, a bombagem de água recorrendo a energias renováveis, como a solar e a eólica, e por fim a integração destas duas tecnologias em edifícios.

Capítulo 3 – Descrição do modelo de produção e armazenamento de energia integrado em edifícios, proposto na dissertação.

Capítulo 4 – Desenvolvimento e análise dos resultados de simulação do modelo de armazenamento e produção de energia proposto.

Capítulo 5 – Aquisição e interpretação dos resultados experimentais obtidos.

Capítulo 6 – Conclusões retiradas do desenvolvimento deste trabalho, assim como o trabalho a desenvolver futuramente.

Capítulo 2 - Estado da arte

O sistema de armazenamento e produção de energia proposto encontra-se muito pouco explorado, no entanto, o seu princípio resulta da integração de duas tecnologias distintas – a bombagem de água recorrendo a energias renováveis e a produção de energia pico-hídrica.

Para melhor contextualizar o sistema proposto, este capítulo começa por fornecer uma visão geral de como a produção hidroelétrica de pequena escala, mais propriamente a produção pico-hídrica está a ser utilizada pelo mundo. Em seguida, apresenta-se o resumo de uma pesquisa que aborda a bombagem de água recorrendo a recursos renováveis e por fim, apresenta-se o estado da arte referente aos sistemas de produção e armazenamento de energia pico-hídrica integrados em edifícios.

2.1 - Produção de energia pico-hídrica

A produção de energia hidroelétrica de pequena escala tem sido implementada em todo mundo como uma alternativa para suprir a falta de acesso à energia elétrica confiável, combater a incerteza dos preços do petróleo, bem como para produzir energia em locais onde a rede já não consegue satisfazer as necessidades exigidas. Nos últimos anos tem-se verificado, na literatura, um crescente interesse nas centrais elétricas de pequena escala, como uma solução económica, ambiental e socialmente eficaz para a produção de energia renovável. [23]

Os sistemas de energia pico-hídricos são esquemas de energia hidroelétrica com geração de uma potência máxima de 5 kW, que permitem aproveitar o potencial de armazenamento de energia da água, encontram-se actualmente mais explorados em áreas rurais e montanhosas onde o acesso à energia é escasso. [23]

2.1.1 - Produção de energia pico-hídrica nos países em desenvolvimento

A maioria dos relatos sobre esquemas de fornecimento energético pico-hídrico referem-se a sistemas projectados para fornecer electricidade em meios rurais, sobretudo de países em desenvolvimento. Nestas comunidades, o acesso à rede elétrica é por vezes escasso devido ao isolamento geográfico, tornando economicamente inviável a utilização da energia da rede, devido aos acrescidos custos de transporte da energia, à baixa densidade populacional e ao baixo potencial de crescimento destas regiões. Nestas situações, muitas

vezes são utilizados sistemas de fornecimento eléctrico alimentados por turbinas hídricas, como solução para fornecer energia suficiente aos residentes para alimentar pequenas cargas como lâmpadas e rádios, trazendo muitos benefícios no desenvolvimento social e económico destas regiões. [27]

Neste tipo de sistemas, que surgem nos países mais pobres, é normalmente utilizada água que é desviada de cursos de água locais ou albufeiras, através de condutas forçadas, até às pequenas centrais hídricas. Nessas centrais a energia potencial da água é convertida em energia eléctrica, recorrendo a turbinas e geradores tipicamente dimensionados especificamente para cada aplicação.

Em [36] refere-se a implementação de um sistema pico-hídrico, no Nepal, na Ásia, capaz de produzir 0,165 kW de potência. O sistema é constituído por um turbina do tipo Kaplan acoplada a um pequeno motor de indução, que roda a uma velocidade de 25 litros por segundo. A água utilizada para fazer girar a turbina provém de um canal, com um desnível de dois metros, construído pela população e abastecido por um curso de água local (ver Figura 2.1). Este sistema conseguiu assegurar a iluminação mínima de trinta habitações locais.

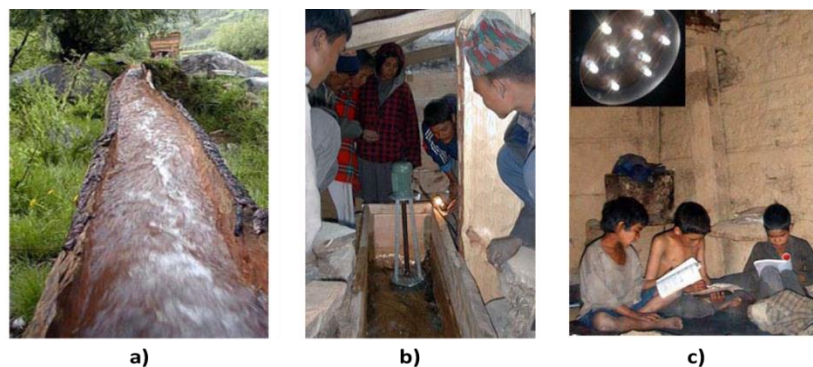


Figura 2.1 – a) Canal de água de madeira que leva água à turbina, b) Instalação pico-hídrica, c) Iluminação de uma habitação (adaptado de [36]).

Em [22], numa cidade também do Nepal, relata-se a implementação de um sistema pico-hídrico capaz de produzir 4,4 kW de potência, posteriormente distribuída por oitenta e oito habitações. Aqui, a cota de água disponível era bastante maior que em [36], aproximadamente cem metros, e foi implementada uma turbina do tipo *Pelton* acoplada também a um gerador de indução que era accionada a uma velocidade de 13,5 litros por segundo. A energia produzida permitiu aos habitantes de *Kushadevi* iluminarem as suas casas e utilizarem pequenas cargas como rádios.

No continente Africano, onde a electrificação rural é das piores do mundo, o recurso a sistemas pico-hídricos para produção de energia também é recorrente. [38] Tal como na Ásia, pequenas redes eléctricas são alimentadas por energia hídrica, que se revela como uma das formas mais económicas de fornecer energia às comunidades rurais, desde que existam recursos hídricos suficientes na região.

De destacar [36], onde se apresenta um estudo de caso da implementação de uma central hidroeléctrica no Kenya, em África. O sistema da central pico-hídrica era constituído por uma turbina tipo *Pelton* directamente acoplada a um gerador de indução (ver Figura 2.2). O grupo turbina-gerador, accionado por um fluxo de água de 8,4 litros por segundo, era capaz de gerar 1,1 kW de potência e fornecer energia a um conjunto de sessenta e cinco habitações, localizadas num raio de 550 metros da turbina. A água que accionava o sistema era proveniente de uma pequena nascente localizada a uma cota de vinte e oito metros em relação à turbina, e o fluxo de água chegava à turbina através de uma conduta forçada de PVC, com 158 metros de comprimento e um diâmetro de 11 centímetros.



Figura 2.2 - Grupo turina-gerador (adaptado de [36]).

Em [37] relata-se a implementação de uma central hídrica bastante semelhante a [36], também implementada no Kenya. Aqui a central era constituída por um gerador de indução acoplado a uma bomba centrífuga utilizada como turbina, que era accionada por um caudal de 28 litros por segundo, provenientes de uma cota de 18 metros. Com este sistema conseguiu produzir-se uma potência de 2,2 kW e electrificar as habitações de 110 famílias.

As zonas rurais da América Latina são também locais promissores para a instalação de sistemas de produção de energia hídrica de pequena escala. Em [38] referem-se vários esquemas hídricos de escala reduzida utilizados para fornecer as necessidades eléctricas de áreas rurais de Cuba, Peru e Colômbia.

2.1.2 - Produção de energia pico-hídrica nos países desenvolvidos

Nos países mais desenvolvidos, as baixas taxas de electrificação rural não são a motivação para a utilização da energia hidroeléctrica de pequena escala. Nestes países são as actuais preocupações ambientais, económicas e a saturação das redes de distribuição que motivam a exploração de formas alternativas de geração de energia, como a produção pico-hídrica.

Actualmente, várias cidades estão a estudar a possibilidade de usar o excesso de pressão, dos sistemas de abastecimento de águas e esgotos das cidades, para mover turbinas integradas nestes sistemas produzindo electricidade. [34, 35]

Em [34] relata-se que a cidade de Boulder, no estado de Colorado, já tem instalado, na sua rede de abastecimento de águas municipais, várias turbinas capazes de fornecer energia suficiente para assegurar 7% do consumo de electricidade de 125 mil moradores da cidade. Este projecto envolveu a instalação de turbinas hídricas acopladas a geradores eléctricos em pontos onde anteriormente operavam válvulas de alívio de pressão no sistema de abastecimento. A pressão da água que flui na canalização é usada para gerar energia e os lucros da comercialização desta electricidade produzida estão a ser utilizados para melhorar a qualidade e reduzir as taxas de água locais.

Cada estação hidroeléctrica utiliza equipamentos dimensionados consoante a sua localização. Nas zonas do sistema de abastecimento onde era necessário manter alguma pressão a jusante da turbina, como as linhas de distribuição antes do fornecimento ao cliente, foram instaladas turbinas tipo Francis. Nas zonas onde não é necessária manter pressão a jusante, como por exemplo descargas em reservatórios à pressão atmosférica, foram usadas turbinas do tipo *Pelton* para produzir energia.

2.2 - Bombagem de água recorrendo a energias renováveis

Hoje em dia, uma das aplicações economicamente mais viáveis para a aplicação de painéis fotovoltaicos é a bombagem de água em áreas remotas. Nestas áreas remotas, um simples sistema fotovoltaico pode elevar a água de um poço ou nascente e armazená-la num depósito, ou também fazer circular a água através de um sistema de aquecimento solar. A água armazenada pode posteriormente ser utilizada na irrigação, na alimentação do gado, ou

no abastecimento de água da população. Para os países em desenvolvimento estas actividades são de extrema importância, compensando o investimento feito neste tipo de sistemas.

O esquema fotovoltaico, de bombagem de água, mais simples é constituído apenas por um painel fotovoltaico ligado a uma bomba DC (ver Figura 2.3). A água bombeada, quando as condições climatéricas são favoráveis, pode ser utilizada no momento ou armazenada para utilização posterior, evitando as desvantagens do armazenamento da energia produzida pelos painéis em baterias. [39]

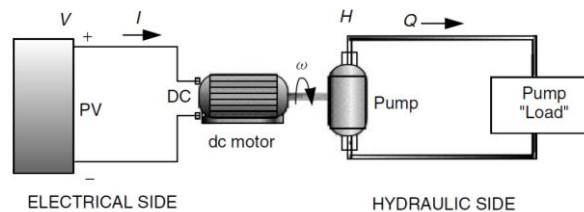


Figura 2.3 – Sistema fotovoltaico de bombeamento e armazenamento de água (adaptado de [39]).

Em [40] descreve-se um estudo experimental para investigar a actuação de um simples sistema de bombagem de água, constituído por uma bomba centrífuga acoplada a um motor DC, que é alimentado por um painel fotovoltaico. Apesar do estudo mostrar que o rendimento do sistema é de aproximadamente 30%, valor típico para este tipo de esquemas, frisa que ele é uma solução bastante plausível em áreas remotas. O sistema é útil para aplicações como irrigação, manutenção de culturas e abastecimento de águas domésticas, especialmente em áreas remotas onde o acesso à água, muitas vezes localizada em poços, exige muito trabalho, que evidentemente afecta a qualidade de vida das comunidades.

O sistema funciona sem bateria e sem um complexo sistema de controlo electrónico, portanto (ver Figura 2.4) não só o custo inicial é baixo, mas também a sua instalação, manutenção e custos de reparação são reduzidos.

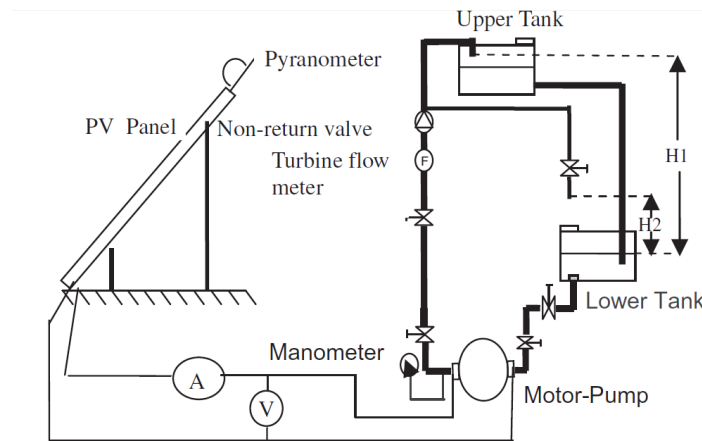


Figura 2.4 - Esquemático do sistema PV de bombagem de água (adaptado de [40]).

Em [41] foram estudadas diversas técnicas de optimização de sistemas fotovoltaicos directamente acoplados a um sistema motor-bomba. Aqui efectua-se um conjunto de estudos estatísticos, com o intuito de optimizar o número de painéis, a sua inclinação e ainda a área necessária para optimizar o sistema, a partir de informações sobre o local de instalação, como os dados meteorológicos, e da informação do fabricante sobre os componentes a utilizar.

Existem relatadas diversas contribuições sobre a bombagem hídrica renovável, desde sistemas mas simples já referidos a outros mais complexos. Em [43] foi desenvolvido o modelo de um sistema de bombagem fotovoltaica, com um motor trifásico, que consegue prever o caudal ao longo do dia, com base nos *datasheets* dos painéis solares, da bomba e a variação solar ao longo de um dia.

No entanto, os sistemas renováveis de bombagem de água não são todos alimentados por energia solar, também existem referências de sistemas de bombagem que utilizam a energia eólica como fonte de energia. Em [44] efectua-se o estudo analítico da implementação de um sistema eólico de bombagem de água, a utilizar nas áreas remotas da Argentina. O sistema apresenta-se como uma solução de baixo custo e é constituído por uma turbina eólica, cujo rotor do gerador se encontra electricamente acoplado a uma bomba centrífuga (ver Figura 2.5). É utilizado um controlo de binário da turbina que permite extrair a máxima potência eólica, para diferentes velocidades do vento, o que se traduz na bombagem do máximo volume de água possível no momento.

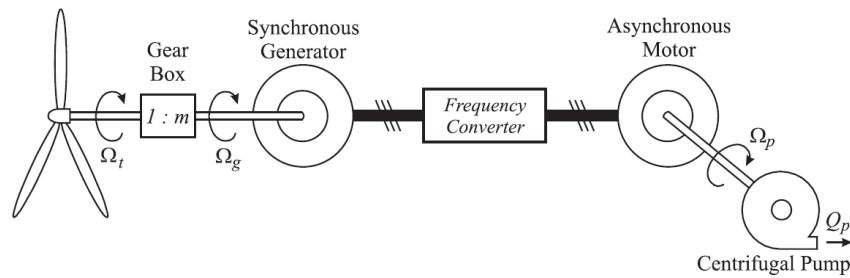


Figura 2.5 – Sistema de bombagem convencional constituído por uma turbina eólica electricamente acoplada a uma bomba centrífuga (adaptado de [44]).

Em [45] refere-se que o uso combinado de energia eólica com sistemas de bombagem é um meio a explorar, em zonas de ventos abundantes, como é o caso das ilhas autónomas Gregas. Nesta tese aponta-se a implementação de sistemas de armazenamento com bombagem de água de larga escala, recorrendo à energia eólica disponível nas ilhas, como forma de garantir eficazmente a sua autonomia energética e reduzir a sua dependência do petróleo para produzir energia.

Em [45], à semelhança do sistema proposto nesta dissertação, mas em larga escala, quando as fontes de energia eólica distribuídas pelas ilhas produzem energia em excesso, a água é bombeada para um reservatório superior e futuramente, quando as necessidades energéticas assim o exigirem, é convertida em electricidade através de uma central hídrica.

O armazenamento de água é um dos métodos, mais divulgado, para armazenamento indirecto de energia eléctrica. A existência de centrais com sistemas de bombagem de água, para depósitos a montante, permite uma gestão eficiente dos recursos hídricos. Pois, o facto de se bombear água nas horas vazias prolonga os períodos em que as centrais hídricas dispõem de água para turbinar, trazendo benefícios ambientais e económicos para a população.

Estes sistemas são muito importantes em redes de produção distribuída, pois permitem efectuar a bombagem de água com o excedente de produção de energia, proveniente de fontes renováveis, e gerar energia quando há défice de produção dessas mesmas fontes.

2.3 – Sistemas de armazenamento e produção de energia pico-hídrica integrada em edifícios

A documentação sobre aplicações energéticas que agregam produção renovável com o armazenamento hídrico, à escala de integração com edifícios, é bastante escassa.

Em sistemas de larga escala a produção hídrica com armazenamento é uma tecnologia bastante madura. O seu princípio básico é armazenar energia sob a forma de energia potencial entre dois reservatórios em altitudes diferentes. Em seguida, é aproveitada a energia cinética da água corrente entre os dois depósitos para girar mecanicamente uma turbina acoplada a um gerador eléctrico, que por sua vez produz energia. [15]

Num contexto mais actual, verifica-se um interesse crescente no armazenamento hídrico com bombagem de larga escala (*Pumped hydro storage* (PHS)). Nestes sistemas, durante os períodos em que a necessidade de entrega de energia é baixa, a energia é utilizada para bombear água do reservatório a altura inferior para o reservatório a altura superior, potenciando a capacidade de produção do sistema nas horas de pico. [20]

No entanto, em pequena escala, a abordagem de integrar uma fonte renovável com o armazenamento hídrico, tal como o sistema proposto nesta dissertação, é praticamente inexistente. Isto, talvez devido ao elevado investimento inicial necessário, surgindo um único relato em [48].

Em [48] apresenta-se um estudo sobre a implementação de uma plataforma didáctica de sistemas híbridos, apelidada de HIDROEOL, que integra fontes de energia hídrica e eólica. Este sistema, desenvolvido para ser integrado num edifício, com 15 metros de altura, da *Technical University of Cluj-Napoca*, é utilizado para armazenar, sob a forma de energia potencial da água, a energia produzida em excesso por uma turbina eólica.

O aproveitamento convencional de energia eólica implica a necessidade de existirem dispositivos de armazenamento, de forma que a energia esteja disponível quando as condições meteorológicas não são favoráveis à produção. Os dispositivos de armazenamento mais utilizados são as baterias, no entanto, este método pode tornar-se bastante caro. Segundo [48] o custo de armazenamento de energia eólica em baterias é cerca de 200€/kWh, o que pode tornar inviável a sua utilização em áreas isoladas e com poucos rendimentos.

Em [48] é feito um estudo sobre a implementação de um sistema de armazenamento de energia, no qual se usa a energia eléctrica produzida por uma turbina eólica, para bombear água para um reservatório na cota elevada do edifício. Desta maneira a energia vai sendo armazenada sob a forma de energia potencial. A partir daqui, a água do depósito na cota superior escoar para um depósito na cota inferior, e ao ser turbinada através de uma turbina hídrica produz energia eléctrica.

A principal vantagem apontada para a implementação deste sistema híbrido, cujo modelo proposto se apresenta na Figura 2.6, é a compensação do carácter flutuante da energia eólica.

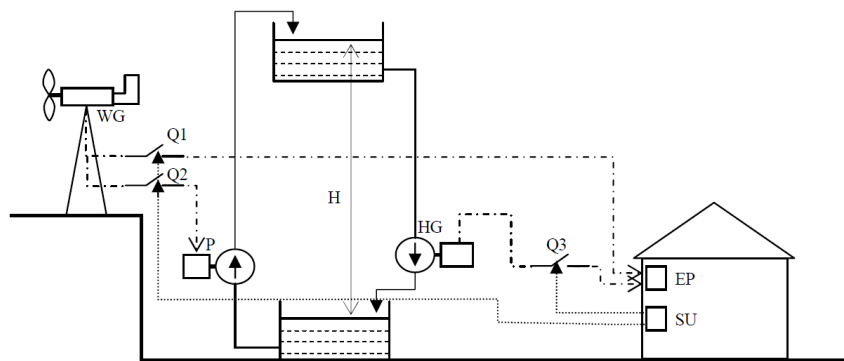


Figura 2.6 - Princípio de funcionamento de um sistema híbrido que integra energia hídrica e eólica: WG – Gerador eólico; P – Bomba de água; HG – Gerador hídrico; EP – Painel eléctrico; SU – Unidade supervisora (adaptado de [48]).

Em [48] fica-se apenas pelas formulações teóricas sem especificar detalhes de construção do modelo, como por exemplo a turbina hídrica a utilizar. Referem apenas que o sistema teoricamente proposto, capaz de gerar 1 KWh de energia, custaria cerca de 6750€, valor que apesar de ser um pouco elevado pode ser relativizado quando as necessidades de recurso forem grandes, como em países sub-desenvolvidos.

A plataforma didáctica, ainda em fase de construção aquando do termino do artigo referenciado em [48], pretende vir a ser usada no estudo da integração da energia eólica no sistema nacional de energia eléctrica local, através da combinação de sistemas de produção de energia eólica com novas formas de armazenamento, com a produção hidroeléctrica.

Em [49] apresenta-se uma proposta de integração de produção pico-hídrica em edifícios, numa cidade do Bangladesh. Esta sugestão concentra-se numa abordagem para

fornecer energia adicional às habitações, através da integração de uma turbina eólica e uma turbina pico-hídrica no telhado do edifício.

Nesta cidade, existem habitações que recorrem ao uso de bombas, ligadas à rede de distribuição, para bombearem água para um reservatório no topo do edifício, que será posteriormente utilizada pelos seus habitantes. Em [49] sugere-se a integração de uma turbina pico-hídrica nesse tanque superior, de forma a aproveitar a energia da água que está a ser bombeada (ver Figura 2.7). Essa energia, que até então era desperdiçada, será guardada numa bateria para posterior utilização da residência, permitindo o accionamento de luzes e electrodomésticos.

Também sugerem a integração de uma turbina eólica, no topo do mesmo edifício, para acumular mais energia na bateria. Além da energia acumulada na bateria, que pode ser utilizada em habitações, escritórios e também indústrias, as grandes vantagens deste sistema são a eliminação dos custos do combustível e a produção de energia limpa.

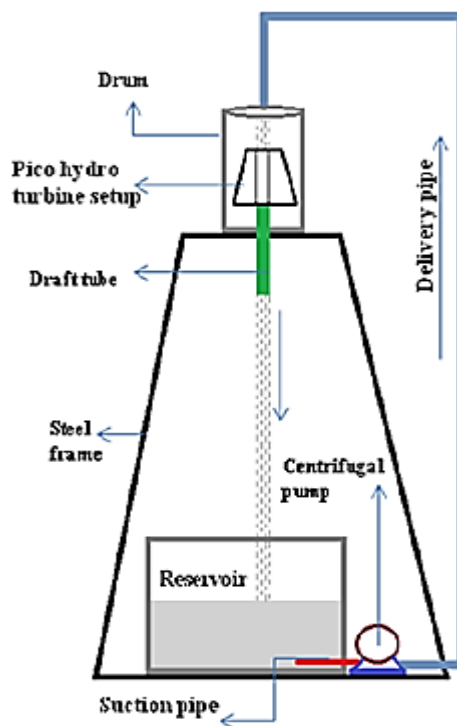


Figura 2.7 – Esquema experimental utilizado para avaliar a integração de produção pico-hídrica em edifícios, numa cidade do Bangladesh (adaptada de [49]).

Capítulo 3 - Descrição global do sistema proposto

Ao longo deste capítulo procede-se à descrição global do sistema de produção e armazenamento de energia proposto. Depois de explicado e enquadrado o funcionamento do sistema, focam-se as opções tecnológicas de maior importância no projecto, como a turbina hídrica e o gerador eléctrico.

3.1 – Sistema de produção e armazenamento de energia proposto

Actualmente a questão energética é um assunto de extrema relevância para o desenvolvimento socioeconómico das populações. Face às alterações climáticas e ao custo dos combustíveis fósseis, os sectores activos na sociedade, têm o desafio de reduzir as suas necessidades energéticas. Para tal, a integração de energias renováveis e a utilização eficiente da energia, representam uma abordagem evidente para satisfazer as necessidades energéticas a curto médio prazo.

Na Europa, 75% da população vive em áreas urbanas, sendo que esta situação levanta problemas como, o aumento do consumo energético nos edifícios, com o consequente aumento dos preços da energia, e as alterações climáticas em termos locais e globais. Para que este fenómeno seja travado é necessário estabelecer desafios que criem respostas concretas, desde as áreas de planeamento urbano, eficiência energética até à integração de energias renováveis nos edifícios. [25]

Os edifícios são um dos sectores mais importantes da economia mundial. Nos países membros da Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), o consumo energético nos edifícios residenciais e comerciais é responsável por aproximadamente 35% do consumo energético total. [26]

A elevada percentagem do consumo energético nos edifícios deixa evidente o potencial de redução nos seus consumos energéticos. A estratégia energética nacional e a presente legislação em Portugal promovem cada vez mais a redução dos consumos nos edifícios, tal como obrigam a utilização de energias renováveis.

Foi no contexto, da reformulação do desempenho energético dos edifícios, que surgiu a obrigatoriedade de todos os novos edifícios se tornarem Edifícios Próximos da Energia Zero

(NZEB) até 31 de Dezembro de 2020. Os NZEB são edifícios cujo balanço energético anual entre a energia produzida e a energia consumida é nulo ou positivo.

Aponta-se que a combinação de medidas de eficiência energética com o uso de fontes de energia renováveis apresenta um elevado potencial no desenvolvimento dos edifícios denominados NZEB. [21]

A integração de sistemas de produção renováveis, em edifícios, é uma medida bastante plausível neste contexto energético, podendo ser vista como uma estratégia para o aumento da sua eficiência energética. Esta alternativa revela-se interessante, uma vez que além de conferir autonomia energética aos edifícios, diminuindo a sua dependência da rede, permite eliminar as perdas de transmissão e distribuição da produção centralizada e os custos que lhe estão associados. Estes custos encontram-se cada vez mais influenciados pela escassez dos combustíveis fósseis e à mercê da liberalização de mercados e dos produtores de energia de grande escala.

Actualmente, em conjuntura com a actual legislação no sector energético, verifica-se um aumento na aposta em sistemas de produção de energia autónomos e descentralizados. Estes sistemas usam os seus próprios geradores como fonte de energia, de forma a satisfazerem a procura eléctrica de um ou mais edifícios. Um sistema autónomo deve ser capaz de suportar aplicações isoladas da rede eléctrica, necessitando indispensavelmente de um sistema de armazenamento, capaz de fornecer energia em alturas de pouca disponibilidade dos recursos endógenos.

O armazenamento de energia assume um papel essencial neste tipo de sistemas. Normalmente são utilizadas baterias, que são carregadas quando o recurso disponível permite obter uma potência superior à potência de carga do edifício. [39]

As principais desvantagens das baterias eléctricas residem na sua capacidade limitada de armazenamento, no curto tempo de vida útil relativamente aos restantes componentes destes sistemas e nos riscos de contaminação ambiental associados à sua reciclagem. [26] Tendo em conta as desvantagens referidas, é necessário inovar os sistemas de produção e armazenamento de energia, de forma a torná-los mais eficientes.

Motivados pelos incentivos e legislação implementada no sentido de se cumprirem as metas ambientais estabelecidas com a Europa, em Portugal, já existem edifícios que integram renováveis para a produção de energia. A exploração destas fontes de energia tem como

principais inimigos o seu carácter flutuante e as desvantagens associadas às soluções de armazenamento existentes no mercado.

Aqui apresenta-se um sistema de produção e armazenamento de energia integrado num edifício. Este sistema pretende armazenar, sob a forma de água, a energia produzida em excesso pelos recursos renováveis, integrados no edifício. Quando a potência produzida pelas fontes renováveis é superior à potência de carga do edifício, a água é bombeada para um reservatório no topo de edifício, aumentando a sua energia potencial. Nos momentos em que a produção não satisfaz o consumo, a energia potencial gravítica da água armazenada é convertida em energia eléctrica, recorrendo aos conceitos da produção hídrica convencional. Na Figura 3.1 apresenta-se o esquema proposto do sistema de produção e armazenamento, integrado em edifícios.

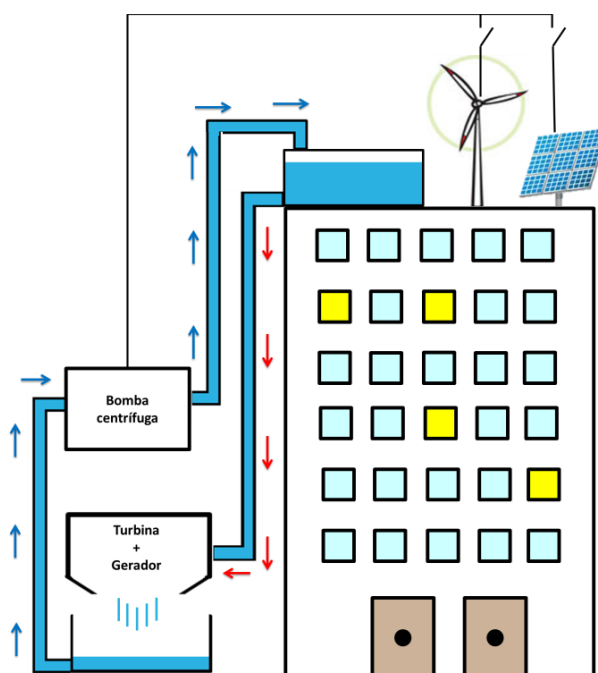


Figura 3.1 - Esquema de funcionamento global do sistema de produção e armazenamento proposto.

Como se pode observar pela Figura 3.1, o sistema proposto pode ser decomposto em dois sub-sistemas distintos – o do armazenamento de energia, que recorre ao uso de bombagem, para elevar a água entre os dois reservatórios e o da produção de energia – que recorrendo à água bombeada para o topo do edifício, e aos princípios da produção hídrica convencional, efectua o reaproveitamento da energia armazenada. A solução proposta tem como suporte o princípio de funcionamento das centrais hídricas com bombeamento

recorrendo a energias renováveis (ver Figura 3.2), neste caso específico, adaptada à escala de integração com um edifício.

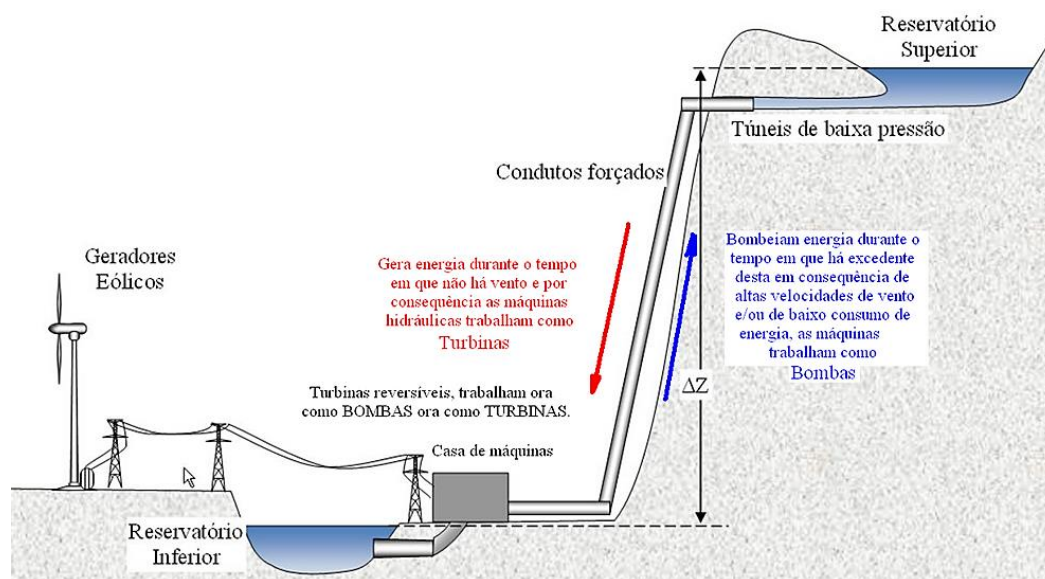


Figura 3.2 - Esquema de produção hídrica com bombeamento recorrendo a energias renováveis. (adaptado de [28]).

O aproveitamento energético recorrendo à bombagem de água é a tecnologia de armazenamento mais difundida e mais antiga, utilizada em sistemas de larga escala. O primeiro modelo surgiu no início do século XX, no entanto, devido aos reduzidos custos dos combustíveis fósseis e do gás natural esta tecnologia foi sendo deixada de parte. Actualmente, devido à crise energética, esta volta a ser uma possível solução, completamente renovável, capaz de satisfazer as necessidades dos consumidores de energia. [27]

O princípio de funcionamento deste tipo de armazenamento energético é simples, necessitando inevitavelmente de dois reservatórios a diferentes altitudes. O principal objectivo é aproveitar a energia originada pelo movimento vertical da água. A água é libertada do reservatório superior e escoa, através de tubagens, até ao inferior. Neste trajecto a água é forçada a passar por turbinas hidráulicas, produzindo energia mecânica que é transformada em energia eléctrica pelos geradores, como indicado nas Figura 3.1 e Figura 3.2, pelas setas vermelhas.

Depois de convertida em energia, a massa de água depositada no reservatório inferior, é bombeada para o reservatório superior recorrendo à bombagem da água, como indicado pelas setas azuis nas Figura 3.1 e Figura 3.2. A energia utilizada para accionar a bomba é

proveniente do excesso de produção de fontes externas, como as energias renováveis eólica e solar.

No caso específico do sistema proposto na Figura 3.1, a água é bombeada para o reservatório superior quando a produção de energia, a partir das fontes renováveis integradas no edifício, é superior à necessidade de carga deste, ou seja, nas suas horas de vazio. Por sua vez, o volume de água armazenado no reservatório superior é turbinado e reconvertido em energia eléctrica quando a carga do edifício é superior à produção das fontes renováveis, isto é, nas horas de ponta do edifício.

3.2 - Classificação hidroeléctrica

No geral, o objectivo principal de um aproveitamento hidroeléctrico é produzir energia eléctrica a partir da energia da água, por meio de um grupo gerador hídrico. A potência que resulta da transformação da energia potencial de uma massa de água, em energia cinética, devida ao deslocamento dessa massa de uma cota superior para uma inferior é dada pela (3.1. [30])

$$P_{in} = g\rho H Q \text{ (W)} \quad (3.1)$$

Onde:

P_{in} – Potência instalada (W);

ρ – Densidade da água (kg/m^3);

g – Aceleração da gravidade ($9,81 m/s^2$);

H – Queda de água útil ⁽²⁾ (m);

Q – Caudal de água (m^3/s).

No processo de conversão da energia eléctrica, a energia potencial da água é transformada em energia mecânica de rotação da turbina hidráulica, que por sua vez será convertida em energia eléctrica nos terminais de um gerador eléctrico. Como em qualquer

⁽²⁾ Diferença entre a queda real e as perdas ao longo dessa queda.

conversão energética existem sempre perdas intrínsecas ao processo, a (3.1 deve ser modificada de forma a ter em conta as perdas associadas ao processo de conversão, como se pode ver na (3.2, onde η representa a eficiência do sistema.

$$P_{in} = \eta g \rho H Q \text{ (W)} \quad (3.2)$$

A variável que mais influência a potência a instalar é o caudal, em virtude de ser o factor que pode apresentar maior variação. Observando a (3.2 pode verificar-se que para um determinado sistema com uma queda útil constante, a potência total instalada varia apenas com a variação do caudal.

No que diz respeito à capacidade de produção hidroeléctrica, os sistemas podem classificar-se de acordo com a potência que são capazes de produzir. Na Figura 3.3 apresentam-se as diferentes escalas de classificação hidroeléctricas de acordo com a potência produzida.

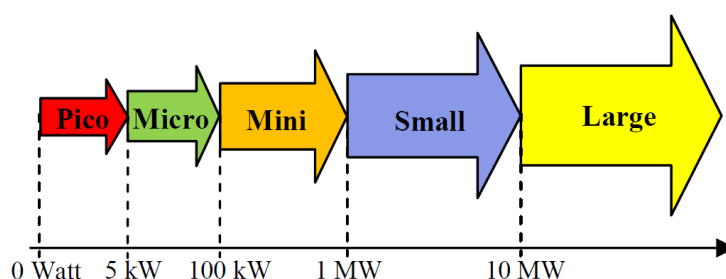


Figura 3.3 - Classificação hidroeléctrica quanto à potência (adaptado de [23]).

Na base da classificação da Figura 3.3 encontram-se os aproveitamentos pico-hídricos, com uma produção eléctrica máxima de cinco quilowatt. Os sistemas hidroeléctricos destas dimensões beneficiam em termos de custos, simplicidade, concepção e instalação quando comparados com produções de potências superiores. As recentes inovações na tecnologia pico-hídrica têm-na tornado numa fonte de energia barata e acessível mesmo às zonas sub-desenvolvidas. Exemplos comuns de dispositivos que podem ser alimentados por sistemas pico-hídricos são lâmpadas, rádios, televisões, frigoríficos, permitindo assim o desenvolvimento de zonas isoladas e sem acesso à rede eléctrica.

O sistema proposto nesta dissertação irá concentrar-se na produção de energia pico-hídrica, visto tratar-se de um sistema integrado em edifícios onde se prevê a capacidade de

gerar potências da ordem de alguns quilowatt. Esperam obter-se potências até 5 kW, uma vez que a integração com o edifício limita a queda útil disponível, a quantidade de água a armazenar e consequentemente o caudal disponível.

3.3 - Opções tecnológicas

De entre os equipamentos que constituem um aproveitamento hidroeléctrico, a turbina e o gerador são os que apresentam maior impacto.

A turbina efectua a conversão da energia cinética, associada ao movimento da água, em energia mecânica. Para aumentar a velocidade da água são criados desníveis entre o reservatório superior e a turbina, usufruindo assim da energia potencial gravítica associada à queda. O gerador é o elemento que se encontra acoplado à turbina e que realiza a conversão da energia mecânica em energia eléctrica.

3.3.1 - Turbinas hídricas

O principal equipamento mecânico presente em pequenos aproveitamentos hidroeléctricos é a turbina hídrica. Consoante o tipo de operação, as turbinas hídricas podem subdividir-se em dois grupos – as turbinas de reacção e as turbinas de acção ou de impulso. [30, 52]

Nas turbinas de acção ou impulso um fluxo de água acelerado embate nas pás da turbina a alta velocidade, fazendo este mudar de direcção. O impulso resultante desse choque faz girar a turbina deixando o fluxo de água com energia cinética diminuída. Para um funcionamento eficiente as pás destas turbinas devem girar no ar, pois se ficarem parcialmente submersas a rotação é afectada. [30]

As turbinas de reacção são caracterizadas por funcionarem imersas em água e, normalmente são colocados dentro de uma caixa protectora de pressão. Este tipo de turbinas utiliza a pressão da água ao invés da sua energia cinética, utilizada pelas turbinas de acção. O seu movimento é originado pelo perfil adequado das pás do rotor, que usufrui da diferença de pressão provocada pela água entre o interior e o exterior da turbina. [30].

As principais turbinas de impulso são: *Pelton*, *Turgo* e *Banki- Mitchell* ou *Crossflow*; as turbinas *Kaplan* e *Francis* são as principais turbinas de reacção; como apresentado na Tabela 3.1. É conveniente referir que existe uma vasta gama de turbinas, no entanto, as características de funcionamento são similares às referidas.

Tabela 3.1 - Turbinas de acção e reacção aplicáveis em aproveitamentos hidroeléctricos. [52]

Turbinas de acção	Turbinas de reacção
<i>Pelton</i>	<i>Kaplan</i>
<i>Turgo</i>	<i>Francis</i>
<i>Crossflow</i>	

A turbina *Pelton* (Figura 3.4 a)) é constituída por uma roda que tem na sua periferia várias pás, em forma de dupla concha, e um injector de água dirigido tangencialmente para a roda. O jacto proveniente do injector incide sobre cada pá e é dividido ao meio, de modo que cada metade retorne para trás com um ângulo de aproximadamente 180° , fazendo a turbina girar. Depois de embater com as pás o jacto de água perde praticamente toda a sua energia e cai para o canal de descarga.

Dependendo do fluxo de água e do modelo, as turbinas *Pelton*, podem operar com quedas tão pequenas como 15 metros e tão elevadas como 1800 metros, sendo por isto muito comum em países montanhosos. As *Pelton* mais pequenas podem medir apenas algumas dezenas de centímetros e são usadas, por exemplo, em aplicações domésticas. Em geral, com o aumento da queda disponível, menor volume de água é necessário para gerar a mesma potência.

A turbina *Turgo* (Figura 3.4 c)) é bastante semelhante à turbina *Pelton*, no entanto, aqui o jacto de água incide sobre cada pá em forma de concha com um ângulo tipicamente de 20° . Este ângulo é posicionado de forma que a água entre de um lado da turbina, incida sobre a pá e saia do outro lado, impelindo assim o movimento de rotação.

As turbinas *Crossflow* (Figura 3.4 b)) são compostas por um rotor cilíndrico tipo tambor, com as pás em forma de lâmina dispostas na sua periferia. Um jacto de água entra no topo da turbina através das lâminas curvas, e emerge do lado oposto com uma segunda passagem do fluido pelas lâminas, fazendo girar a turbina através de um duplo impulso. A forma das lâminas é tal que, em cada passagem através da periferia do rotor, a água transfere parte da sua quantidade de movimento antes de sair fora do sistema com uma energia residual pequena.

A turbina Kaplan (Figura 3.4 d)) assemelha-se a uma hélice propulsora de um navio. As pás do rotor estão dispostas de modo que a água circule entra as mesmas. Um distribuidor fornece água sob pressão a partir dos lados da turbina e a água que sai com um determinado ângulo empurra as lâminas faz girar o rotor.

A turbina Francis (Figura 3.4 e)) é, essencialmente, uma forma modificada da turbina da Kaplan na qual a água flui radialmente para dentro do rotor e está imerso em posição axial. O rotor é normalmente montado numa caixa com forma espiral cujo interior é composto por palhetas ajustáveis. A principal característica da Francis é o facto de a água mudar de direcção à medida que passa pela turbina. Isto é, a água entra radialmente na turbina e vai alterando a sua direcção até sair na direcção do eixo da turbina. A altura da queda de água e o tamanho do caudal influenciam a forma da turbina.

As turbinas de reacção requerem um processo de fabricação mais sofisticado do que as turbinas de impulso, porque envolvem o uso de lâminas alinhadas de forma mais complexa juntamente com invólucros cuidadosamente perfilados. Estas restrições de fabricação tornam estas turbinas mais caras e, por isso, menos atraentes para uso da produção hídrica nos países em desenvolvimento.

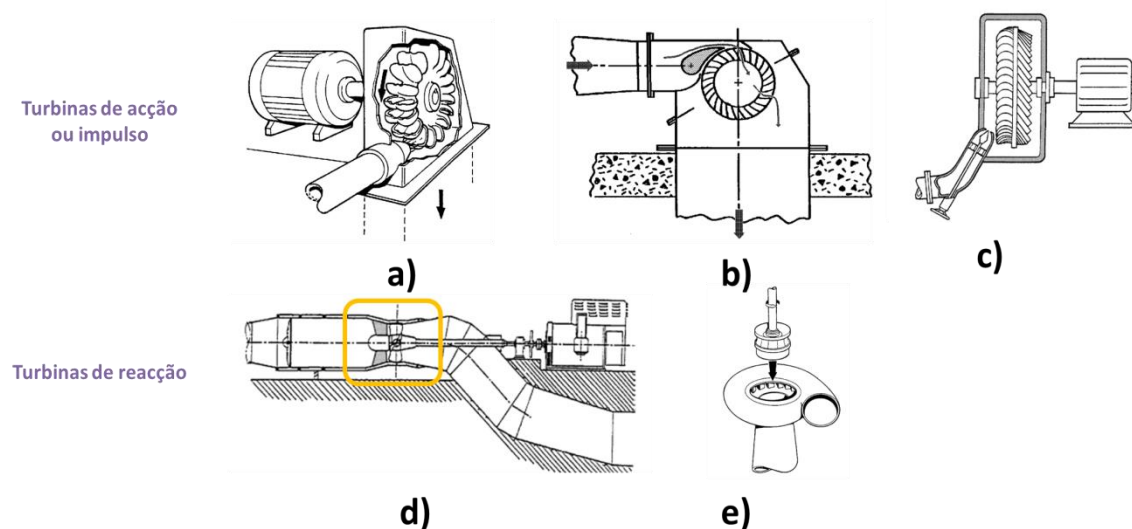


Figura 3.4 - a) Turbina tipo *Pelton* b) Turbina tipo *Crossflow* c) Turbina tipo *Turgo* d) Turbina tipo *Kaplan* e) Turbina tipo *Francis* (adaptado de [30]).

A escolha da turbina a utilizar é um factor crucial para o bom rendimento do sistema e resulta da interacção de três parâmetros – caudal, queda útil e potência. A Figura 3.5

apresenta uma tabela gráfica, que tendo em conta os parâmetros referidos, apoia na selecção de turbinas para aproveitamentos hidroeléctricos.

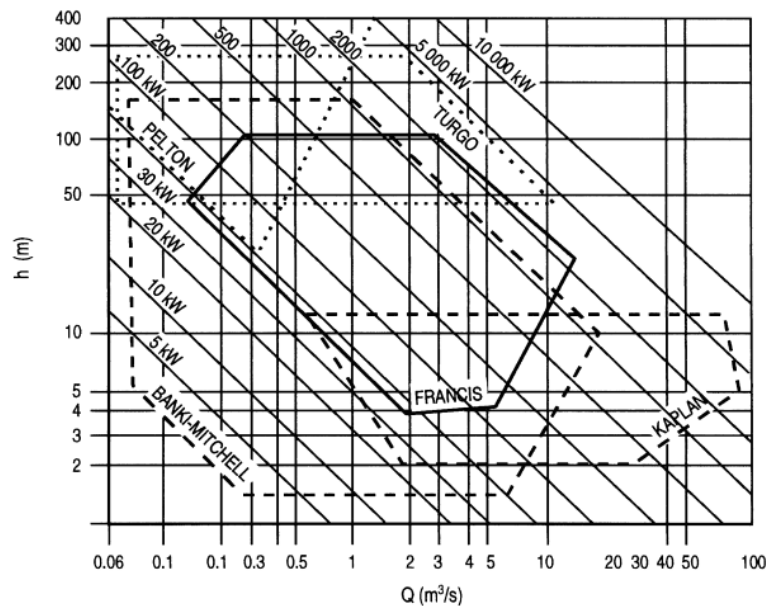


Figura 3.5 - Tabela gráfica para selecção de turbinas em função do caudal, queda e potência do sistema (adaptado de [24]).

Através da Figura 3.5 pode verificar-se que as turbinas de acção são mais adequadas para sistemas caracterizados por quedas relativamente elevadas e caudais baixos. Por vezes, para potências inferiores, as turbinas *Pelton* podem também funcionar com quedas intermédias. Em quedas intermédias utilizam-se principalmente as turbinas tipo *Francis* e também as tipo *Crossflow* ou *Banki-Mitchell*. Associadas a quedas mais baixas surgem as turbinas *Kaplan*, aparecendo ainda algumas incursões do tipo *Crossflow*.

Um factor também significativo na comparação dos diferentes tipos de turbinas é a sua eficiência, tanto no seu funcionamento nominal como com fluxos mais reduzidos. A turbina é concebida para funcionar no seu ponto de eficiência máxima, normalmente, 80% do fluxo nominal, mas na prática esse fluxo varia bastante. As curvas típicas de eficiência apresentam-se na Figura 3.6.

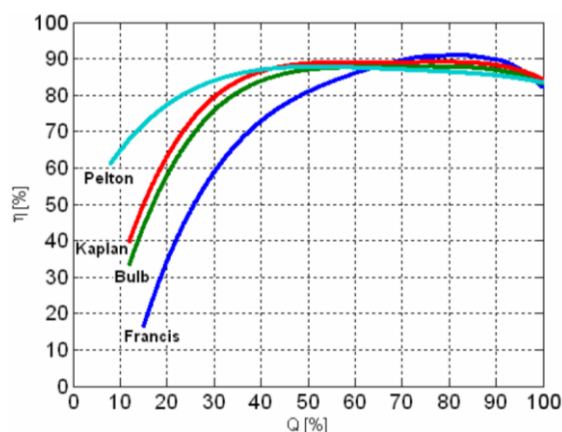


Figura 3.6 - Curvas típicas de eficiência de turbinas hídricas (adaptado de [50]).

Pela Figura 3.6 é importante notar que as turbinas *Pelton* podem operar satisfatoriamente numa ampla gama de fluxos, cerca de 20% a cerca de 100% do seu valor nominal. A eficiência da turbina *Kaplan* cai drasticamente quando esta funciona com fluxos inferiores a 30% do seu caudal nominal, enquanto a *Francis* tem uma eficiência aceitável apenas quando o fluxo é superior a cerca de 50% do fluxo nominal. Abaixo de 40% do fluxo nominal, as turbinas tipo *Francis* podem mostrar instabilidade mecânica resultando em vibração ou até mesmo choques mecânicos. [50]

3.3.2 - Gerador eléctrico

O principal equipamento eléctrico presente em pequenos aproveitamentos hidroeléctricos é o gerador eléctrico. O gerador é o elemento que se encontra acoplado à turbina e que realiza a conversão de energia mecânica em energia eléctrica.

A selecção do gerador irá depender de uma série de factores; além das características da turbina seleccionada, particularmente, do seu valor de velocidade nominal e de embalamento, da sua constante de inércia, do seu rendimento e tipo de regulação, deverá também ter-se em conta quais os geradores disponíveis, o seu custo e a sua utilização final, ou seja, o tipo de saída eléctrica pretendida (por exemplo, CA ou CC). [47, 52]

Existem disponíveis diferentes tipos de máquinas eléctricas, que podem ser divididos em máquinas de corrente alternada (CA) e máquinas de corrente contínua (CC). Por sua vez os geradores CA distribuem-se por dois grupos, os geradores síncronos ou alternadores e os geradores assíncronos ou de indução.

As máquinas síncronas têm tipicamente o campo magnético do rotor produzido por magnetos permanentes ou este é excitado externamente por uma fonte de CC. São máquinas eficientes, simples e flexíveis. Os geradores síncronos apresentam a vantagem de poderem ser operados de forma autónoma, sendo normalmente escolhidos para utilizar em aplicações fora da rede. [32]

Os geradores assíncronos por sua vez, criam por indução do estator, um campo magnético no rotor, apresentam um custo inferior aos geradores síncronos, e devido às suas características de robustez e fiabilidade tornam-se os mais adequados para aplicações ligadas à rede. [32]

As máquinas de corrente contínua podem-se dividir em máquinas com ou sem escovas. As sem escovas são apenas uma máquina de CA com a comutação feita electronicamente. As máquinas CC com escovas necessitam de anéis colectores ou escovas, que se desgastam, requerendo manutenção acrescida e também causando quedas de tensão. Ao funcionar como gerador estas máquinas produzem uma saída CC irregular. [47]

Capítulo 4 - Modelação do sistema de armazenamento e produção de energia pico-hídrica

Ao longo deste capítulo, focam-se separadamente os sistemas de armazenamento e produção pico-hídrica abordados ao longo da dissertação. Depois de descritos e caracterizados os sistemas de forma separada, procede-se à sua modelação e respectiva validação através de modelos de simulação reproduzidos no *MatLab*®.

4.1 – Modelação do sistema de produção pico-hídrica

O sistema de produção de energia proposto pretende ser integrado num edifício, com o objectivo de reaproveitar a energia armazenada, sob a forma de água, no topo deste. Ele é constituído por uma turbina tipo *Pelton*, um gerador de corrente contínua de magnetos permanentes e uma resistência de carga variável, como representado na Figura 4.1.

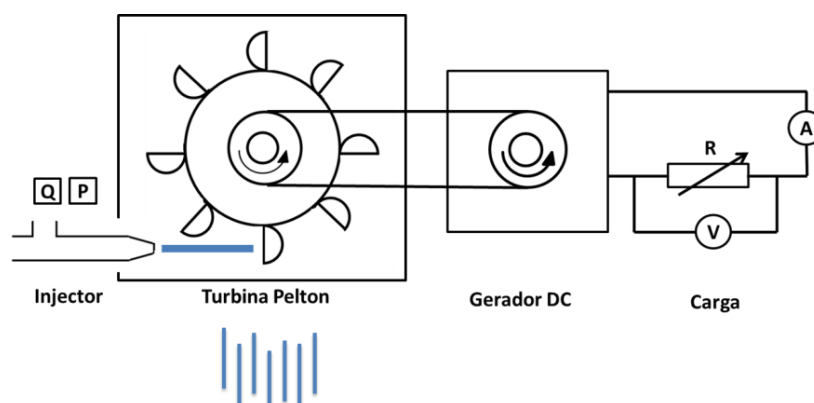


Figura 4.1 – Esquema do sistema de produção de energia.

O princípio de funcionamento deste sistema é relativamente simples. A água que acciona a turbina flui, ao longo de uma conduta forçada, até um injector localizado junto da turbina. A energia hídrica do jacto de água, que sai pelo injector, é transmitida para as pás da turbina *Pelton* e convertida em energia mecânica disponível no seu veio. Ao veio da turbina encontra-se acoplado um gerador CC de magnetos permanentes que converte a energia mecânica em energia eléctrica que será transferida para a carga do sistema. A carga do sistema permite quantificar a energia produzida e é aqui representada por uma resistência variável, que na realidade pretende representar a carga eléctrica do edifício.

As cargas eléctricas normalmente conectadas a sistema pico-hídricos são iluminação, e alguns electrodomésticos como carregadores de bateria, rádios, televisões, ventiladores e frigoríficos.

A selecção da turbina a utilizar é muito importante na concepção e desenvolvimento de um sistema de produção de energia hídrica. O tipo de turbina hídrica a utilizar deve ser seleccionado com base na gama de velocidades e capacidade de potência do gerador de energia a acoplar. Normalmente, as turbinas de impulso são mais fáceis de projectar e consequentemente mais baratas que as turbinas de reacção.

A turbina *Pelton* é uma turbina de impulso bastante universal, sendo muito usada em sistemas de produção de pequena escala, sobretudo em sistemas pico-hídricos. Esta turbina não é restrita apenas para cotas elevadas; para cotas mais reduzidas, onde a potência transmitida ao veio é menor, deterá velocidades de rotação mais lentas. No entanto, ela apresenta valores de eficiência bastante aceitáveis para caudais muito inferiores ao seu caudal nominal, permitindo manter assim uma boa performance em cotas mais reduzidas. [30]

No sistema de produção de energia pico-hídrica proposto utiliza-se uma turbina *Pelton*, devido à sua adequabilidade e ao facto de poder ser utilizada em aplicações de cota média e caudais mais reduzidos. Tendo em conta que o objectivo final é a integração deste sistema com um edifício esta apresentou-se a escolha mais viável, pois o facto de a água disponível estar limitada pelo volume de um reservatório posicionado na estrutura do edifício, os caudais obtidos e a cota disponível serão limitados e reduzidos. A turbina *Pelton* de pequena escala apresenta ainda vantagens que reforçaram a sua escolha com o facto de ser pouco dispendiosa e fácil de reproduzir numa gama variada de dimensões.

A selecção do gerador a utilizar num esquema hidroeléctrico deve ter em atenção alguns critérios de selecção como – a potência estimada para o sistema hidroeléctrico, o tipo de saída eléctrica (CA ou CC) e a relação custo-eficiência do gerador.

Normalmente, os sistemas pico-hídricos utilizam geradores de corrente alternada como o gerador de indução e a máquina assíncrona. Isto porque normalmente estes sistemas são utilizados para alimentar cargas de corrente alternada, e além disso os geradores de corrente contínua para potências superiores são caros e as suas escovas precisam de manutenção considerável.

No entanto, neste projecto utiliza-se um gerador CC de magnetos permanentes, uma vez que apenas se pretendem alimentar cargas de corrente contínua, com a energia

armazenada na água. Uma vantagem significativa no uso do GMP CC, em detrimento do uso de geradores de corrente alternada, é que o primeiro é projectado para fornecer correntes elevadas a tensões mínimas, requisito para carregar baterias e operar directamente cargas com corrente contínua. [52]

Além disso, seleccionou-se o GMP CC, pois é mais barato, fácil de controlar e tem menor dimensão global, facilitando o seu accionamento através da energia mecânica da turbina *Pelton*. Para além disso, este tipo de gerador, como não necessita de excitação independente, torna-se mais eficiente pois nenhuma energia é desperdiçada para gerar o campo magnético. [52]

4.1.1 – Modelo analítico da turbina *Pelton*

Depois de descrito o esquema teórico do sistema de produção pico-hídrico referido ao longo desta dissertação, aqui procede-se à modelação matemática da parte mecânica do sistema, mais propriamente a modelação da turbina *Pelton*, recorrendo às equações de Newton.

A turbina *Pelton* é uma turbina de impulso de construção simples e bastante utilizada em aplicações pico-hídricas. É uma máquina bastante eficiente e particularmente adequada para aplicações de cota média-alta (> 10 metros). [30] O rotor da turbina *Pelton* é constituído por um eixo cilíndrico com um conjunto de pás, usualmente chamadas de baldes ou conchas, espaçadas em torno da sua periferia. Um ou mais injectores que devem ser fixados de forma que cada um dirija o seu jacto ao longo de uma tangente à circunferência definida pelo centro das pás, como indicado na Figura 4.2 a).

As pás da turbina *Pelton* são muitas vezes denominadas de dupla concha, devido à sua geometria possuir uma saliência que divide a meio cada uma das pás. Esta saliência faz com que o jacto de fluido que incide na pá se espalhe pela sua superfície, separado em duas partes iguais. Depois de fluir pela superfície interna da pá, o fluido, afasta-se na direcção quase oposta do jacto de entrada, como apresentado na Figura 4.2 b).

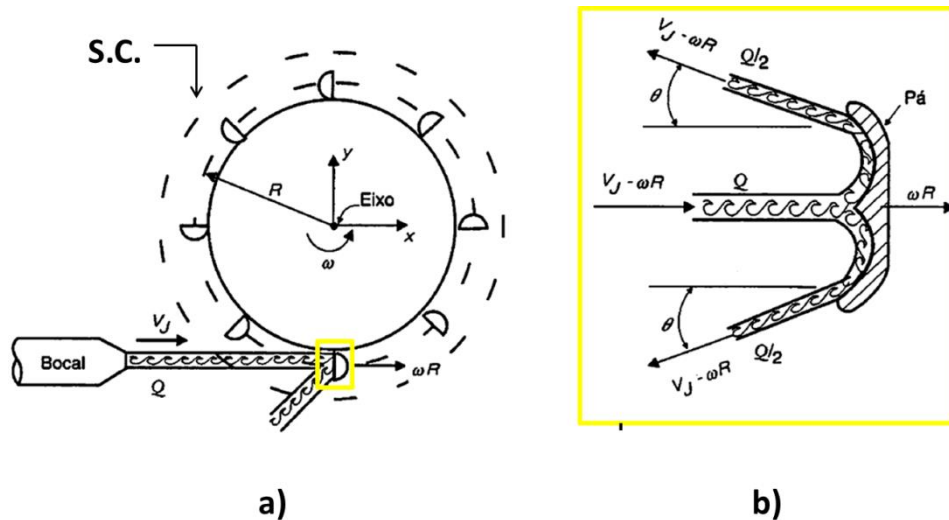


Figura 4.2– a) Esquema simplificado de uma turbina *Pelton* comum b) Detalhe da incidência do jacto de água sobre a pá (adaptada de [51]).

Para modelar o comportamento da turbina *Pelton*, ou seja determinar o binário produzido no seu veio, recorre-se à equação do momento angular, como sugerido por *Celso Pohlmann Livi*, em [51].

Para tal assume-se que o binário é transmitido à turbina, que se encontra com velocidade angular constante ω , pela energia de um jacto de água. Este jacto possui um determinado caudal Q e abandona o injector com uma velocidade linear v_j . O rotor da turbina possui um raio R desde o seu eixo até ao centro das pás onde incide o jacto livre. Como já referido, a geometria das pás permite dividir o jacto de água em duas partes iguais que, após a deflexão, deixam as pás formando um ângulo θ em relação ao eixo x , conforme mostrado na Figura 4.2 b).

Recorrendo à segunda lei de Newton pode verificar-se que o binário resultante que actua num sistema é igual à taxa de variação do momento angular desse mesmo sistema (ver (4.1)).

$$\sum \vec{T} = \frac{d\vec{H}}{dt}, \quad (4.1)$$

onde \vec{T} representa o binário do sistema e \vec{H} o seu momento angular.

De acordo com [51], conjugando a segunda lei de Newton com a noção de volume de controlo ^[3] e assumindo que o sistema e o volume de controlo são coincidentes, no instante de tempo t , pode dizer-se que:

$$(\sum \vec{T})_{\text{sobre o sistema}} = (\sum \vec{T})_{\text{sobre o volume de controlo}}$$

Que segundo [51] pode ser descrito por:

$$\sum \vec{T} = \iint_{S.C.} (\vec{r} \times \vec{v}) \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA + \frac{d}{dt} \iiint_{V.C.} (\vec{r} \times \vec{v}) \rho dV \quad (4.2)$$

Fazendo uma análise, em regime permanente, do movimento da turbina o termo da taxa de variação da (4.2) é nulo, tal que:

$$\sum \vec{T} = \iint_{S.C.} (\vec{r} \times \vec{v})_z \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \quad (4.3)$$

Como a rotação do rotor da turbina *Pelton* ocorre no plano xy , em torno do eixo z , apenas se considera a componente z da equação do momento angular, dada pela (4.2), pois nos outros planos o momento angular é nulo.

Pode determinar-se o binário mecânico da turbina definindo um volume de controlo estacionário e coincidente com a superfície de controlo ^[4] S.C., mostrada na Figura 4.2. De acordo com [51], como o integral de superfície apresentado na (4.3) representa o fluxo de momento angular na S.C., é possível obter-se a expressão do binário mecânico no eixo da turbina apresentada na (4.4).

$$\left(\begin{matrix} \text{binário mecânico} \\ \text{eixo} \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} \text{fluxo de momento} \\ \text{angular que entra no V.C.} \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} \text{fluxo de momento} \\ \text{angular que sai do V.C.} \end{matrix} \right) \quad (4.4)$$

Por forma a especificar-se o binário produzido no eixo da turbina *Pelton* procede-se em seguida à determinação do fluxo de momento angular que entra e sai do V.C., respectivamente.

^[3] Volume de controlo - Região arbitrária e imaginária, no espaço, através da qual um fluido escoar. [51]

^[4] Superfície de controlo - Superfície do contorno geométrico do volume de controlo, e pode ser real ou imaginária, indeformável ou deformável, estacionária ou em movimento, conforme a conveniência para o problema em estudo. [51]

Admitindo que o jacto de água, com massa específica ρ , incide no volume de controlo com uma velocidade v_j e um caudal Q , obtém-se o fluxo de momento angular que entra no V.C.

$$\left(\begin{array}{c} \text{fluxo de momento} \\ \text{angular que entra no V.C.} \end{array} \right) = R v_j \rho (-Q)$$

Para determinar o fluxo que sai do V.C., pode observar-se, na Figura 4.2 b), que após a deflexão resultam dois jactos de igual caudal, que correspondem a metade do caudal que incide na pá. Estes jactos abandonam a pá com uma velocidade relativa v_r , formando um ângulo θ com o eixo do x , de tal forma que:

$$v_x = v_r \cos \theta$$

Admitindo que o rotor da turbina possui uma velocidade angular ω , tal que as suas pás se deslocam a uma velocidade linear $v_p = \omega R$. O jacto de água, que sai do injector com velocidade v_j , ao incidir sobre a pá que se desloca com uma velocidade v_p , surge uma velocidade relativa v_r resultante da interacção entre o jacto de água e a pá. Esta velocidade relativa apresenta-se na (4.5).

$$v_r = v_j - v_p = v_j - \omega R. \quad (4.5)$$

Desprezando o atrito e o efeito da gravidade sobre o jacto livre, a velocidade relativa do jacto em relação à pá mantém-se constante, e após a deflexão o jacto abandona a pá com módulo de velocidade igual à com que esta é atingida. Sendo assim,

$$v_x = (v_j - \omega R) \cos \theta .$$

O escoamento de água que sai do V.C. definido possui um caudal Q e uma componente de velocidade segundo x denominada v_x , de tal forma que o fluxo de momento angular que sai do V.C. se pode representar pela (4.6).

$$\left(\begin{array}{c} \text{fluxo de momento} \\ \text{angular que sai do V.C.} \end{array} \right) = R [\omega R - (v_j - \omega R) \cos \theta] \rho Q \quad (4.6)$$

Substituindo os parâmetros apresentados na (4.4, obtém-se o binário mecânico no eixo da turbina *Pelton*.

$$\left(\begin{array}{c} \text{binário mecânico} \\ \text{eixo} \end{array} \right) = R v_j \rho (-Q) + R [\omega R - (v_j - \omega R) \cos \theta] \rho Q$$

Reorganizando as variáveis, o binário mecânico do eixo da turbina *Pelton* será dado por:

$$T_{eixo} = -R(v_j - \omega R)(1 + \cos \theta)\rho Q \quad (4.7)$$

Onde R , v_j , ω , θ , ρ e Q são respectivamente o raio da turbina até ao centro das pás, a velocidade do jacto, a velocidade angular da turbina, o ângulo de escoamento com que a água deixa a pá da turbina, a densidade da água e o caudal que sai do injector.

4.1.2 – Modelo analítico do gerador de corrente contínua

Depois de modelado o binário produzido no eixo da turbina hídrica, efectua-se aqui o estudo da parte eléctrica do sistema, passando à modelação do gerador, de corrente contínua, utilizado no projecto proposto.

Quanto ao modo de funcionamento, as máquinas eléctricas, podem ser classificadas como motor, no caso de transformarem a energia eléctrica em energia mecânica, e como gerador, se transformarem a energia mecânica em eléctrica. Aqui é utilizado um gerador de corrente contínua para transformar a energia mecânica produzida pela turbina *Pelton* em energia eléctrica.

Os motores e os geradores de CC são máquinas rotativas que podem ser divididas em duas partes, uma estacionária e a outra girante. A parte fixa é denominada de estator e a parte móvel é chamada de rotor.

Nas máquinas de corrente contínua o estator é constituído por um indutor de pólos salientes de magnetos permanentes, que tem como função criar o campo magnético no qual giram os condutores da armadura. Nesta parte além dos pólos propriamente ditos, existe também um par de escovas.

O rotor ou armadura é constituído por um núcleo de aço laminado, no qual existem ranhuras destinadas a receber os enrolamentos condutores. No mesmo eixo do rotor, existe ainda um conjunto de segmentos de cobre, ao que se dá o nome de comutador, sobre o qual deslizam as escovas, que servem de condutores intermediários entre o enrolamento da armadura e o circuito externo. O comutador converte a corrente alternada que passa pela armadura em corrente contínua que depois é libertada através das escovas.

A Figura 4.3 ilustra uma máquina de corrente contínua de magnetos permanentes, que pode ser usada como motor ou gerador consoante a aplicação pretendida.

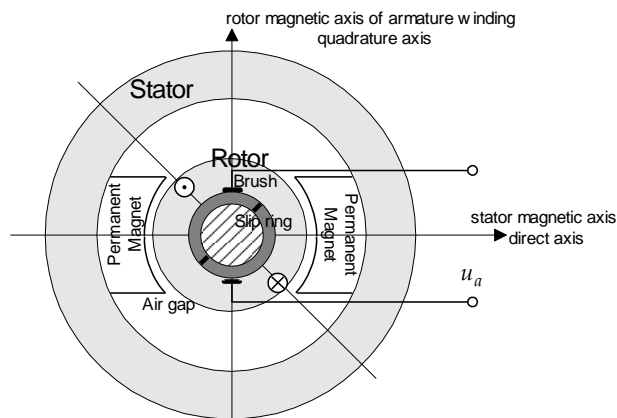


Figura 4.3 - Esquema da máquina CC de magnetos permanentes.

O funcionamento das máquinas de corrente contínua com magnetos permanentes é bastante semelhante ao das máquinas convencionais. A diferença é que nas máquinas convencionais o campo magnético é criado por enrolamentos posicionados ao longo do estator, e nas máquinas de magnetos permanentes esse campo é criado pelos próprios magnetos. Sendo assim, a modelação de ambas as configurações é bastante semelhante.

As principais vantagens da utilização de magnetos permanentes são a menor complexidade construtiva, o facto de não ser necessário circuito de excitação e a redução de volume e peso da máquina, factores determinantes quando se pretende gerar energia mecânica a partir de uma turbina hídrica de pequenas dimensões.

A deslocação das pás da turbina hídrica produz um movimento relativo entre os condutores eléctricos dos enrolamentos da armadura e o campo magnético produzido pelos magnetos permanentes. Assim, provoca-se uma variação temporal da intensidade do campo magnético, e pela Lei de *Faraday* induz-se tensão aos terminais dos condutores do gerador.

Pelas Leis de *Lenz* e *Faraday*, sempre que um condutor ou espira se movimenta dentro de um campo magnético, ao cortar as linhas de força, surge nos seus terminais uma força electromotriz induzida (*f.e.m*), que tende a opor-se à variação do campo magnético que lhe deu origem ((4.8). Se os condutores ou espiras forem ligados a uma carga, o circuito será percorrido por uma corrente eléctrica induzida.

$$f.e.m = -n \times \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.8)$$

$f.e.m$ representa a força electromotriz, n o número de espiras e $\frac{d\Phi}{dt}$ a variação do fluxo magnético.

Um gerador de corrente contínua de magnetos permanentes pode ser modelado através da análise do circuito eléctrico equivalente, apresentado na Figura 4.4, onde e representa a força electromotriz da máquina, e R_a e L_a representam a resistência e a indutância dos enrolamentos do gerador, respectivamente. A queda de tensão aos terminais do gerador, cuja velocidade no eixo da armadura é representada por ω_a , é aqui denominada de u .

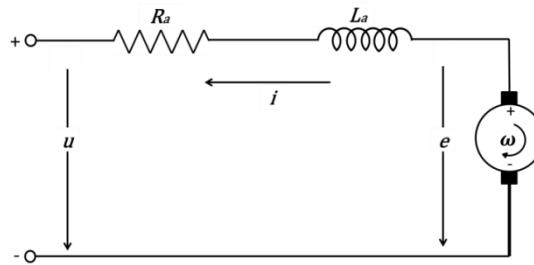


Figura 4.4 - Modelo de um gerador CC de magnetos permanentes.

Analisando o circuito equivalente da Figura 4.4 verifica-se que pode ser descrito pela equação diferencial (4.9).

$$L_a \times \frac{di(t)}{dt} + R_a \times i(t) - e(t) + u(t) = 0 \quad (4.9)$$

A força electromotriz do gerador, devida ao campo magnético de excitação, é directamente proporcional à sua velocidade linear e a uma constante de velocidade, denominada k_ω , como indicado na (4.10). O valor da constante k_ω representa uma característica construtiva da máquina que deve ser fornecida pelo fabricante.

$$e(t) = k_\omega \times \omega_a(t) \quad (4.10)$$

Como o fluxo magnético gerado pelos magnetos permanentes é constante, pode dizer-se que o binário electromagnético do gerador é proporcional à corrente da armadura $i(t)$, como apresentado na (4.11).

$$T_e(t) = k_T \times i(t), \quad (4.11)$$

k_T , denominada constante de binário da máquina, representa uma característica de construção do gerador fornecida pelo seu fabricante.

A mudança de velocidade do gerador resultante da diferença entre os binários mecânico e electromagnético, pode ser determinada a partir da equação do movimento de rotação de *Newton* ((4.12).

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_L - T_e \quad (4.12)$$

T_L é o binário mecânico aplicado no veio do rotor, T_e o binário electromagnético gerado e J o momento de inércia combinado da turbina e gerador.

Idealmente, em regime permanente, o binário electromagnético gerado deveria ser igual ao binário mecânico da turbina. No entanto, nem toda a potência mecânica fornecida ao gerador é convertida em potência eléctrica. As perdas de potência mecânica ocorrem através da resistência do enrolamento do rotor, por histerese, perdas por correntes de *Foucault* no ferro do rotor, que a partir daqui serão englobadas na parcela das perdas por atrito, e ainda devido à inércia do rotor e da turbina a ele acoplada em relação ao eixo do gerador. O binário necessário para superar as perdas de atrito designa-se de T_f e o binário de inércia do sistema denomina-se de T_J .

Sendo assim, em todo o instante de tempo, o binário produzido pela turbina, T_L , deve ser igual e oposto à soma do binário electromagnético no induzido com o binário necessário para vencer o atrito e a inércia do sistema. Assim obtém-se o binário mecânico apresentado na (4.13:

$$T_L(t) = T_f(t) + T_e(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (4.13)$$

Onde o binário de inércia se encontra representado pelo produto do momento de inércia J com a aceleração do momento angular $\frac{d\omega(t)}{dt}$.

A componente correspondente ao binário total de atrito do eixo, normalmente chamado de atrito viscoso B , é uma função linear da velocidade angular do rotor que é geralmente separada dos restantes binários de atrito, como se mostra na (4.14).

$$T_L(t) = T_f(t) + T_e(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (4.14)$$

As equações (4.9), (4.10), (4.11) e (4.14) constituem o conjunto básico de equações que modelam o gerador de corrente contínua.

Assumindo um funcionamento em regime permanente, a tensão aos terminais do gerador apresenta-se na (4.15).

$$U = E - R_a \times I \quad (4.15)$$

4.1.3 – Validação do sistema de produção pico-hídrica

As secções anteriores deste capítulo trataram de modelar os principais constituintes do sistema de produção pico-hídrica: a turbina e o gerador. Com base nesses modelos aqui é simulado o sistema de produção pico-hídrica, com o objectivo fundamental de avaliar o seu desempenho.

Sabe-se que, na conversão hidroelétrica, a potência hídrica disponível pode ser transformada em energia eléctrica através de um grupo gerador constituído por uma turbina e um gerador eléctrico. No entanto, este fenómeno dá-se por partes, ocorrem várias transformações, surgindo perdas em cada uma delas. Inicialmente a turbina hídrica, do tipo *Pelton*, transforma a energia hídrica disponível, em energia mecânica no seu eixo. Por sua vez, o gerador eléctrico, acoplado à turbina, transforma a energia mecânica desenvolvida no eixo da turbina, em energia eléctrica disponível aos seus terminais, como mostra a Figura 4.5.

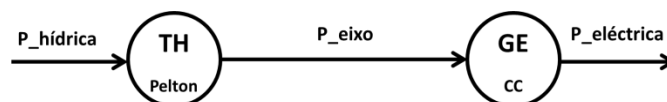


Figura 4.5 - Transformações de energia na conversão hidroelétrica.

Através da análise das potências mostradas na Figura 4.5 pode obter-se a eficiência de cada transformação:

$$\eta_{TH_{Pelton}} = \frac{P_{eixo}}{P_{hídrica}},$$

$$\eta_{GECC} = \frac{P_{elétrica}}{P_{eixo}},$$

onde $\eta_{TH_{Pelton}}$ e η_{GECC} representam a eficiência da turbina *Pelton* e do gerador, respectivamente.

A eficiência da conversão hidroelétrica, ou do grupo-gerador (η_{GG}), pode determinar-se através do produto das eficiências da turbina hídrica e do gerador eléctrico ((4.16).

$$\eta_{GG} = \eta_{TH_{Pelton}} \times \eta_{GECC} = \frac{P_{elétrica}}{P_{hídrica}} \quad (4.16)$$

4.1.3.1 - Modelo de simulação do sistema de produção pico-hídrica

A fim de averiguar a eficiência do sistema de produção proposto anteriormente implementa-se um modelo computacional de simulação. A ferramenta utilizada para o efeito é o pacote *Simulink*® pertencente ao *software Matlab*®. Este é um *software* bastante difundido e citado na literatura em geral, apresentando-se como uma poderosa ferramenta, com uma interface relativamente simples.

O *Simulink*® é uma ferramenta de modelação e simulação que possui diversas bibliotecas que incluem os recursos necessários para a implementação das simulações pretendidas neste projecto. Além da biblioteca básica *Simulink* utilizou-se também a biblioteca *SymPowerSystems* que possui componentes eléctricos, incluindo o modelo completo da máquina CC de magnetos permanentes.

A partir dos modelos matemáticos desenvolvidos anteriormente, implementou-se o modelo de simulação apresentado na Figura 4.6.

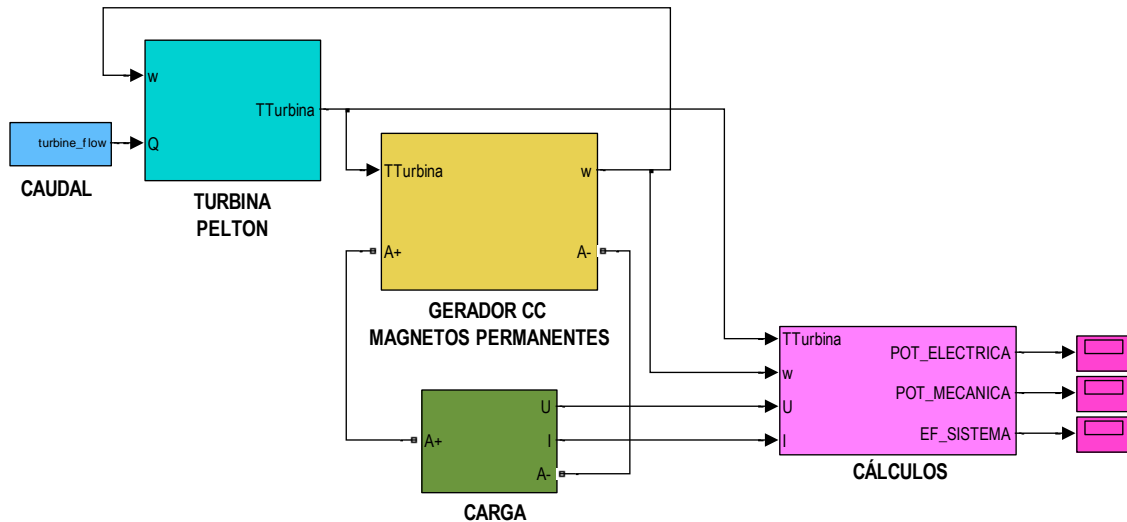


Figura 4.6 – Modelo de simulação utilizado na validação do sistema de produção, construído em Simulink®.

Explicando a Figura 4.6, o bloco CAUDAL permite ao utilizador accionar a turbina com um determinado caudal, em $m^3 s^{-1}$. Este caudal pode assumir valores constantes ou variáveis ao longo do tempo.

O bloco denominado TURBINA PELTON implementa a equação (4.7, que representa o binário mecânico no eixo da turbina. Esta equação descreve o comportamento da turbina hídrica para diferentes caudais de admissão e diferentes ângulos de incidência do jacto de água nas suas pás.

Para efeitos de simulação considerou-se que a temperatura média da água que acciona a turbina é de 20°C, possuindo assim uma densidade de fluxo de aproximadamente $998,7 kg m^{-3}$. A turbina *Pelton* utilizada possui um diâmetro de 12 cm e assume-se ainda que o jacto de água que incide nas pás é retornado com um ângulo de 15°.

Em conjunto todos estes parâmetros permitem determinar o binário mecânico aplicado no eixo do gerador CC de magnetos permanentes, que é retornado na saída TTurbina do bloco TURBINA PELTON, do sistema representado na Figura 4.6.

O gerador CC de magnetos permanentes, representado pelo bloco GERADOR CC DE MAGNETOS PERMANENTES, pertence à biblioteca *SimPowerSystems* do *Simulink*® e modela as (4.9 e (4.14. Aqui utilizou-se um gerador compatível com o sistema, ou seja, tendo em conta as reduzidas dimensões da turbina utilizou-se, para simulação, um gerador com uma inércia e coeficiente de atrito viscoso reduzidos.

A carga do sistema, denominada de CARGA, que na realidade deverá representar a carga eléctrica do edifício, será aqui representada por uma resistência variável. É a partir desta resistência que se quantifica a potência produzida pelo sistema.

4.1.3.2 - Resultados de simulação do sistema de produção pico-hídrica

Com os modelos construídos no *Simulink*®, realizaram-se vários ensaios, com a intenção de constatar qual o desempenho do sistema projectado e validar as características de funcionamento da turbina hídrica.

A análise dos resultados teóricos divide-se em duas partes. Efectuaram-se simulações fazendo variar o caudal de admissão da turbina e a resistência de carga do sistema, podendo determinar-se o desempenho do sistema e dos seus principais constituintes: a turbina e o gerador. Posteriormente, tendo em conta que o objectivo principal é a integração do sistema num edifício, realizam-se simulações recriando essa situação específica.

Numa primeira etapa verificou-se como varia a eficiência da turbina *Pelton*. A eficiência da turbina *Pelton* é representada pela razão entre a potência no eixo da turbina e a potência do jacto de água que a acciona, como mostrado na (4.17).

$$\eta_{TH_{Pelton}} = \frac{T_{eixo} \times \omega}{P_{jacto_agua}} \quad (4.17)$$

Onde a potência do jacto se obtém a partir da (4.18).

$$P_{jacto_agua} = \frac{1}{2} \times \rho \times v_{jacto}^2 \times Q \quad (4.18)$$

Recorrendo ao esquema de simulação da Figura 4.6 e fazendo variar os valores de caudal e de resistência de carga, é possível apresentar o gráfico da Figura 4.7. Onde se apresenta uma curva de eficiência bastante plana, próxima dos 0.9, verificando-se um decaimento significativo de eficiência apenas para valores de caudal mais reduzidos. Isto significa que a turbina *Pelton* modelada apresenta resultados de eficiência bastante positivos e com um comportamento bastante próximo do esperado. Como se pode observar comparando o gráfico da Figura 4.7 com o da Figura 3.6, onde consta a curva típica de eficiência das turbinas *Pelton*.

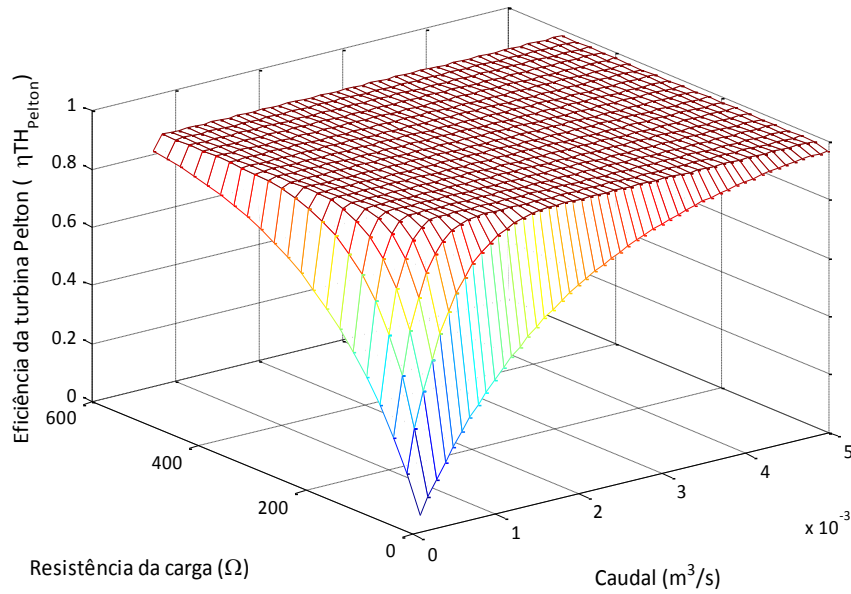


Figura 4.7 – Gráfico que representa a curva de eficiência da turbina Pelton com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.

À medida que o caudal aumenta a eficiência mantém-se aproximadamente constante demonstrando o bom desempenho da turbina *Pelton* para uma ampla gama de caudais.

O gerador eléctrico é responsável por transformar a energia mecânica gerada no eixo da turbina, em energia eléctrica. Sendo assim, a sua eficiência pode descrever-se pela (4.19).

$$\eta_{GEC} = \frac{U_{carga} \times I_{carga}}{T_{eixo} \times \omega} \quad (4.19)$$

À semelhança do procedimento anterior, variou-se de novo o valor do caudal e da resistência de carga e verificou-se qual o andamento da curva de eficiência do gerador eléctrico.

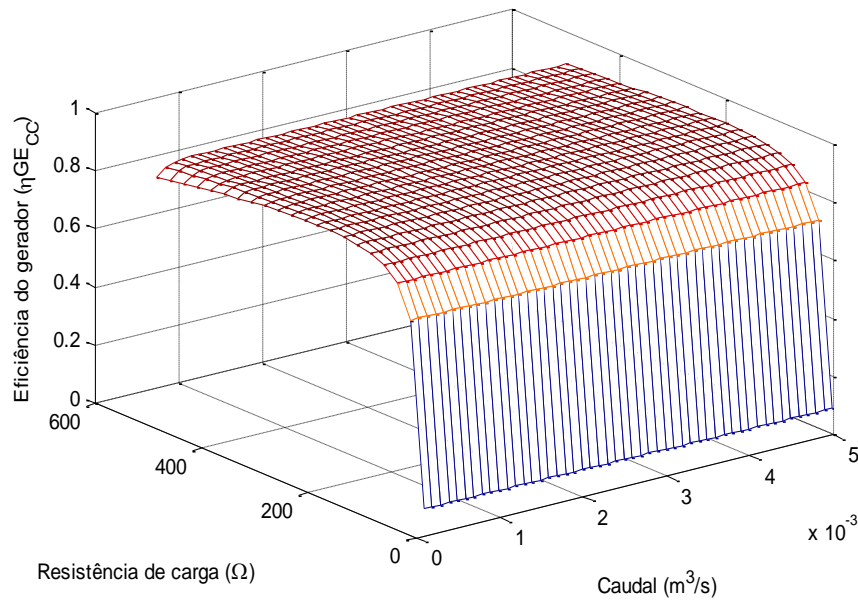


Figura 4.8 – Gráfico que representa a curva de eficiência do sistema do gerador com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.

Analisando a Figura 4.8 verifica-se que, para um determinado valor de caudal, o aumento da resistência de carga leva a um aumento da eficiência do gerador. Este aumento não é infinito, a partir de um valor máximo de resistência a eficiência começa a diminuir. Na Figura 4.8 isto não é evidente, pois os resultados apresentados foram efectuados com uma gama reduzida de resistências, devido ao elevado tempo de computação das simulações.

Com o aumento do caudal verifica-se um ligeiro aumento na eficiência do gerador. Isto deve-se ao facto de, para caudais superiores, o veio da turbina girar com mais velocidade, permitindo assim gerar mais energia nos terminais do gerador.

A eficiência de um grupo gerador pode ser representada como um factor de conversão entre potência eléctrica activa, entregue ao sistema pelo gerador, e a potência hídrica recebida pela turbina. Esta relação pode ser representada pela (4.20).

$$\eta_{GG} = \frac{U_{carga} \times I_{carga}}{P_{jacto_agua}} \quad (4.20)$$

Na Figura 4.9 encontra-se representado o desempenho do grupo gerador-turbina, com a variação do caudal de admissão da turbina e da resistência de carga do gerador.

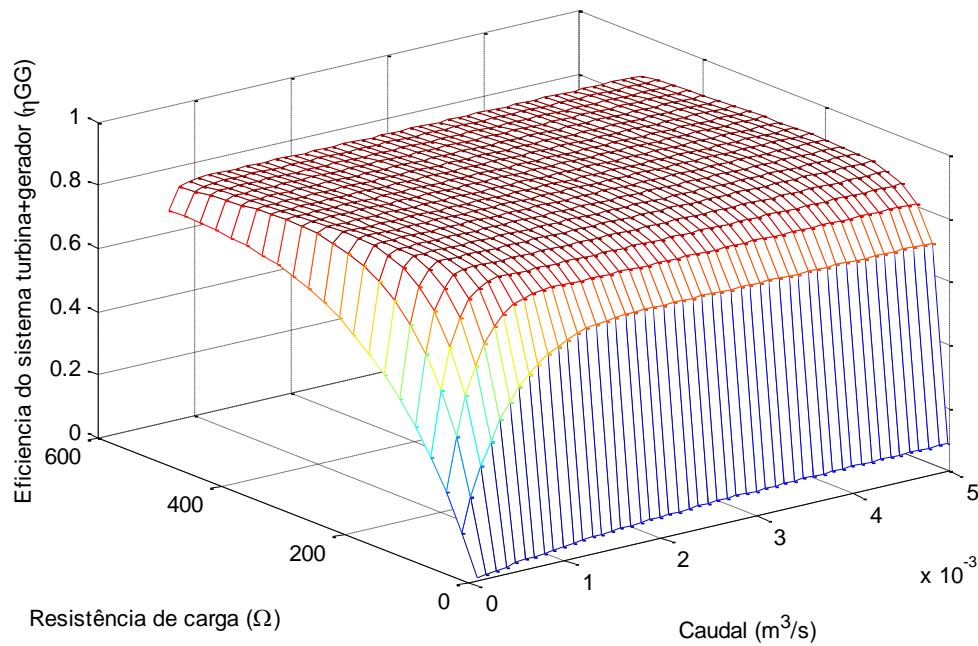


Figura 4.9 – Gráfico que representa a curva de eficiência do sistema de produção pico-hídrica com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga.

Pela análise da Figura 4.9, verifica-se que a eficiência do grupo turbina-gerador aumenta com o aumento do caudal de admissão da turbina. Com o aumento da resistência de carga verifica-se também um aumento da eficiência do grupo turbina-gerador, no entanto, para valores superiores de resistência de carga a eficiência deverá começar a diminuir.

Observando o gráfico da Figura 4.10, verifica-se que a potência na resistência de carga aumenta com o caudal, mais uma vez devido ao facto de o aumento de caudal provocar um aumento na velocidade de rotação da turbina. Verifica-se ainda que o aumento da resistência leva a um aumento da potência de carga até ao seu valor máximo. A partir daí a potência na carga começa a diminuir com o aumento da resistência.

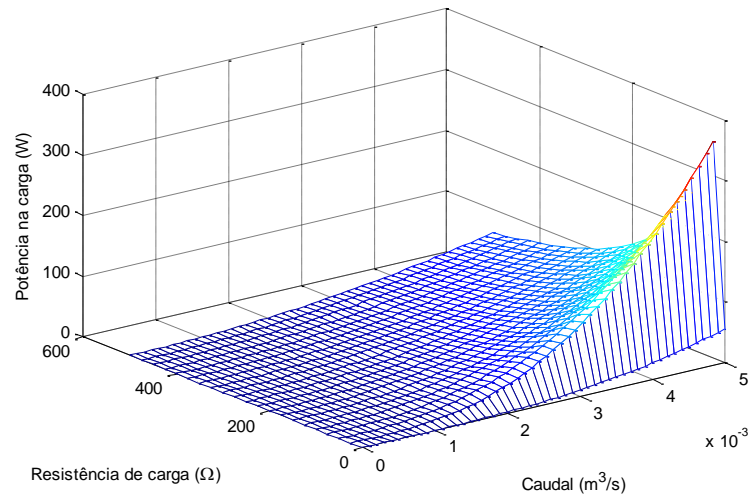


Figura 4.10 – Gráfico que representa a curva de variação da potência na carga do sistema com a variação do caudal de admissão e da resistência de carga

Em seguida analisa-se a situação específica da integração do sistema de produção hídrica com um edifício. Neste caso, o edifício de Engenharia Electrotécnica, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Para tal, inicialmente verifica-se qual o caudal esperado no reservatório inferior do edifício e depois simula-se o sistema assumindo que a turbina *Pelton* é accionada com esse mesmo caudal.

O caudal teórico esperado pode calcular-se recorrendo ao Teorema de *Bernoulli* para fluidos com perda de carga, apresentado na (4.21).

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + h_A = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + h_B + h_f \quad (4.21)$$

Onde:

P_A e P_B – Pressão nos pontos A e B, respectivamente.

γ – Peso específico da água.

v_A e v_B – Velocidade da água nos pontos A e B, respectivamente.

h_A e h_B – Cota das posições A e B, respectivamente

h_f – Perda de carga entre A e B.

A perda de carga (pressão) entre dois pontos pode classificar-se como perda de carga contínua e perda de carga localizada. A primeira refere-se às perdas que ocorrem ao longo da

canalização, a segunda ocorre nos acessórios do circuito hidráulico, como por exemplo nas válvulas e nas curvaturas do circuito.

As perdas de carga contínua podem calcular-se analiticamente pela fórmula universal de *Darcy-Weisbach*. No entanto existem fórmulas práticas, de menor complexidade, propostas por *Hazen Wilians* e *Flamant*, que permitem quantificar as perdas de carga contínua em tubos de diâmetro maior e menor que 50 mm, respectivamente.

Pelo teorema representado na (4.21 e analisando a situação representada na Figura 4.11 é possível determinar, de forma aproximada, o caudal de água que flui do depósito situado no topo do edifício.

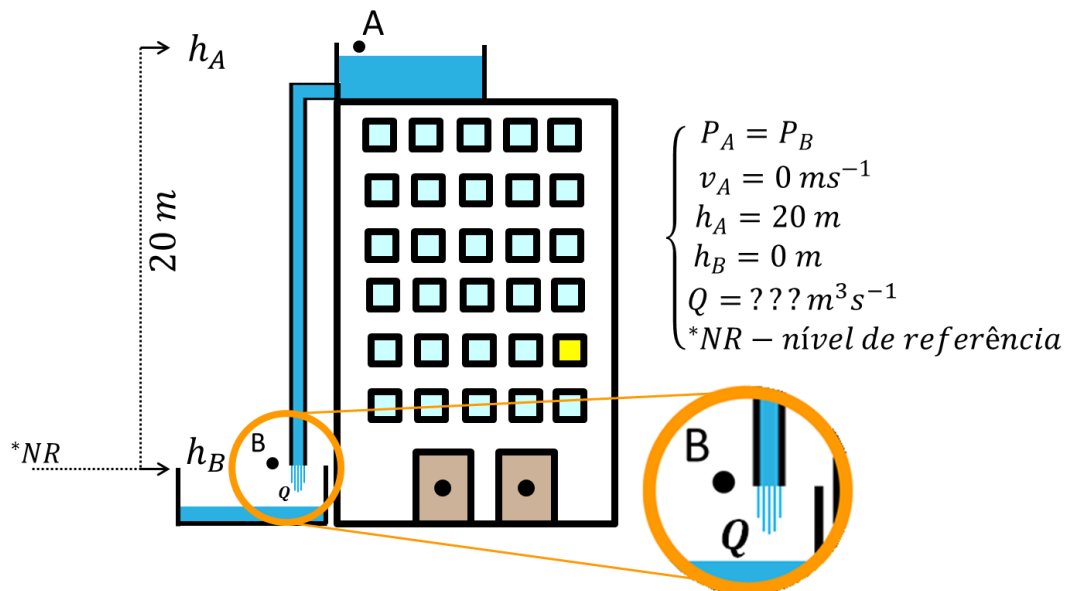


Figura 4.11 – Esquema hidráulico que permite determinar o caudal que flui na canalização.

O esquema da Figura 4.11 representa o escoamento de água do depósito situado no topo do edifício, com aproximadamente 20 metros de altura, até à admissão da turbina *Pelton*, através de uma canalização com diâmetro de 1 ½ polegada.

Para se estimar o valor do caudal que circula na canalização, considera-se um circuito simplificado, onde apenas se tem em consideração as perdas de carga contínuas desprezando-se as perdas de cargas localizadas. Como o diâmetro da tubulação é inferior a 50 mm as perdas de carga podem calcular-se com recurso à fórmula empírica de *Flamant* representada na (4.22).

$$h_f = 6,107 \times b \times \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \times L. \quad (4.22)$$

Onde:

b – Coeficiente de *Flamant*, tabelado em função do material do tubo (PVC $b = 0,000135$).

L – Comprimento da canalização (m).

Q – Caudal ao longo da canalização ($m^3 s^{-1}$).

D – Diâmetro da canalização (m).

Considerando as (4.21 e (4.22, e tendo em conta a situação específica representada na Figura 4.11 é possível calcular-se o caudal ao longo da canalização,

$$0 + 0 + h_A = 0 + \frac{v_B^2}{2g} + h_B + h_f \Leftrightarrow h_A - h_B = \frac{v_B^2}{2g} + h_f.$$

Sabendo que $v_B = \frac{Q}{A}$, onde A representa a área de secção da canalização obtém-se a (4.23).

$$h_A - h_B = \frac{Q^2}{A^2 2g} + 6,107 \times b \times \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \times L \quad (4.23)$$

Substituindo os valores já conhecidos, permite chegar-se à conclusão que ao longo da canalização deverá circular um caudal de aproximadamente $0,0075 m^3 s^{-1}$, ou seja cerca de $7,5 ls^{-1}$.

Depois de conhecido o caudal que escoar do topo do edifício da Figura 4.11, efectuaram-se simulações, accionando a turbina *Pelton* com esse caudal. As simulações efectuadas pretendem verificar a eficiência e a potência na carga do sistema com a variação da resistência de carga.

Na Figura 4.12 apresenta-se a curva de eficiência para o caudal de $7,5 ls^{-1}$, em função da resistência de carga.

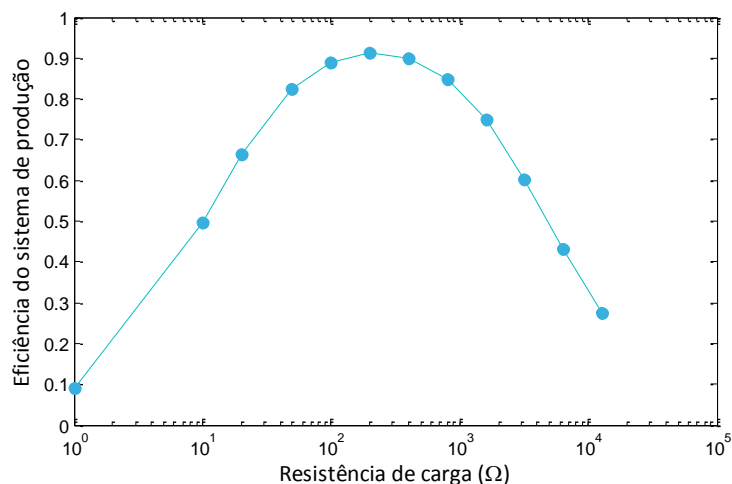


Figura 4.12 - Curva de eficiência do sistema de produção para o caudal de $7,5 \text{ L s}^{-1}$.

Analisando a Figura 4.12 verifica-se que o rendimento máximo esperado para uma cota de aproximadamente 20 metros é de cerca de 90%. Observa-se ainda que existe um ponto óptimo de resistência a partir do qual o valor da eficiência começa a decair.

Como já referido, o binário produzido pela turbina *Pelton*, está dependente do jacto de água. Quanto mais no centro da pá o jacto incidir maior será o impulso transmitido às pás da turbina. Na Figura 4.13 apresenta-se a variação da potência na carga com a variação do ângulo com que o jacto de água retorna da pá. Quanto maior for o ângulo θ menor será o impulso transmitido à pá, e por sua vez menor será a velocidade de rotação da turbina, o que se traduz numa diminuição da potência entregue à carga.

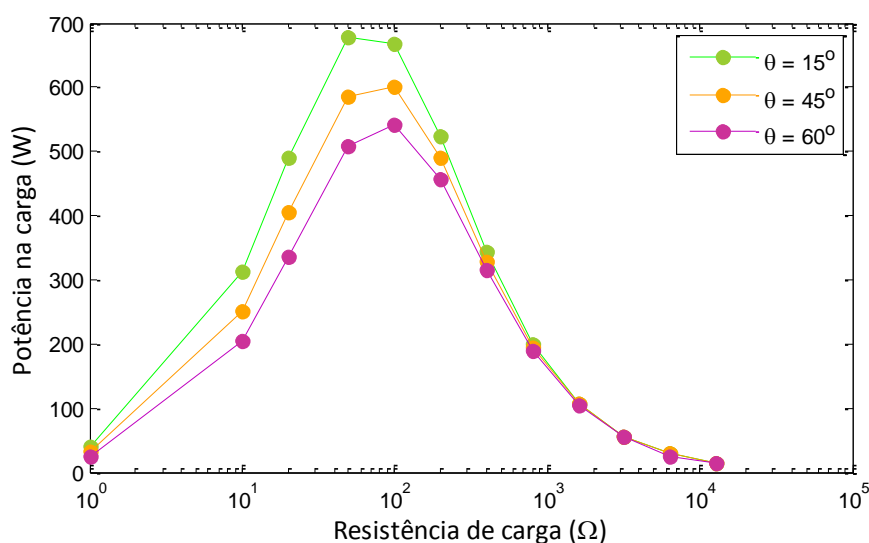


Figura 4.13 – Variação da potência de carga com a variação do ângulo teta.

Pela análise da Figura 4.13 verifica-se que quanto menor for o impulso transmitido pelo jacto menor será a potência na carga. Sendo assim, o ideal é que o jacto incida no centro da pá da turbina para que água retorne com o menor ângulo possível. Pela curva verde, da Figura 4.13, verifica-se que para um ângulo de 15° se espera uma potência teórica máxima na carga de aproximadamente 700 W, quando a turbina é accionada com um caudal de $7,5 \text{ ls}^{-1}$.

4.2 – Modelação do sistema de armazenamento hídrico

O princípio de funcionamento do sistema de armazenamento é relativamente simples. O sistema é constituído por uma bomba centrífuga e dois reservatórios de água, como representado na Figura 4.14. A energia produzida em excesso pelas fontes renováveis, integradas no edifício, é utilizada para accionar uma bomba centrífuga que bombeia a água de um reservatório inferior até um reservatório superior, situado no topo do edifício. A água é armazenada no reservatório, situado no topo do edifício, para posteriormente ser utilizada no sistema de produção de energia pico-hídrica da Figura 4.1.

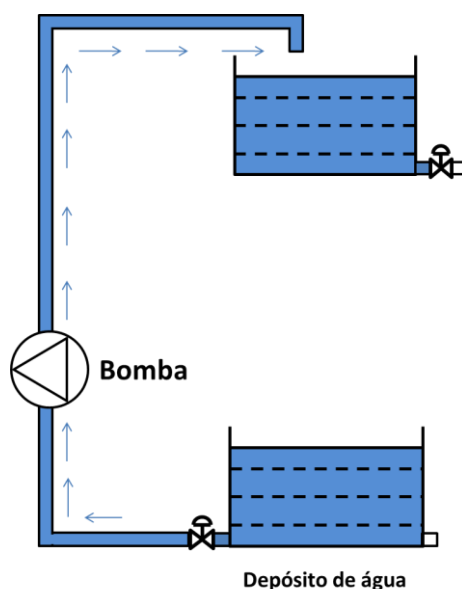


Figura 4.14 – Esquema do sistema de armazenamento de energia.

A quantidade de energia armazenada no sistema da Figura 4.14 está dependente do volume dos depósitos. Quanto maior for o depósito, maior será a quantidade de energia armazenada. Como o sistema funciona com um circuito hidráulico fechado, os dois reservatórios devem ter o mesmo volume.

4.2.1 – Funcionamento da bomba centrífuga

As bombas centrífugas são dispositivos mecânicos que permitem mover fluidos, como neste caso a água. A água entra na bomba através do bocal de sucção e depois é encaminhada para o rotor que lhe cede energia cinética. A energia cinética cedida ao fluido é convertida em energia potencial de pressão no bocal de descarga da bomba. Esta energia apresenta-se sob a forma de diferença de pressão entre a sucção e a descarga da bomba e é conhecida como altura manométrica da bomba. É esta diferença de pressão que permite mover a água através da canalização. A quantidade de pressão que a bomba pode criar depende do caudal que a atravessa. [29]

Quanto mais rápido o rotor girar ou quanto maior ele for mais energia será transferida para a água sob a forma de energia cinética. [29]

As características de uma bomba centrífuga são normalmente representadas pelas curvas P-Q (pressão-caudal), disponibilizadas pelos fabricantes, e obtidas experimentalmente. A pressão representada na curva característica refere-se à diferença de pressões entre a saída e a entrada da bomba, e pode representar-se como uma cota (do Inglês *head*), cujas unidades são *mca* (metros de coluna de água).

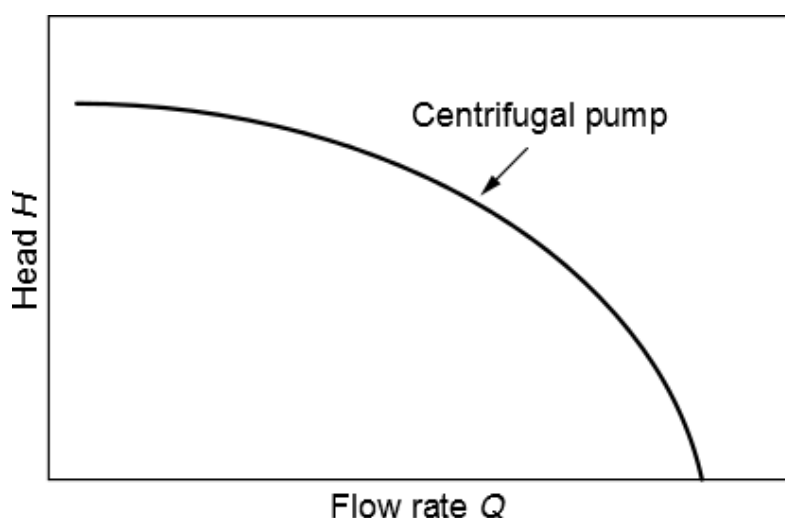


Figura 4.15 – Curva característica P-Q teórica de uma bomba centrífuga (adaptado de [27]).

As curvas P-Q mostram, para uma dada quota, qual o caudal a que a bomba opera. Normalmente a cota é medida em metros de coluna de água (*mca*). A vantagem de se usar metros como unidade de medida é que a curva P-Q de uma determinada bomba não é influenciada pelo tipo de líquido que tem de manusear. [10]

As bombas centrífugas são accionadas por uma potência externa que pode advir de motores eléctricos CC ou CA. Em aplicações em que o fornecimento eléctrico é feito por painéis fotovoltaicos, é preferível usar-se um motor CC, já que este tem boa eficiência e pode ser directamente acoplado aos painéis fotovoltaicos, accionando assim directamente a bomba. Os motores de CA necessitam de inversores, para converter a saída em corrente contínua dos painéis. [9]

As curvas P-Q são normalmente apresentadas para a velocidade de rotação nominal do veio da bomba. No entanto, há aplicações onde a velocidade é variável, tais como nos sistemas fotovoltaicos, onde não se garantem as condições nominais de funcionamento dos motores. Nesses casos, a curva P-Q segue o comportamento apresentado na Figura 4.16. Com a diminuição da velocidade de rotação verifica-se uma diminuição da capacidade de bombagem da bomba.

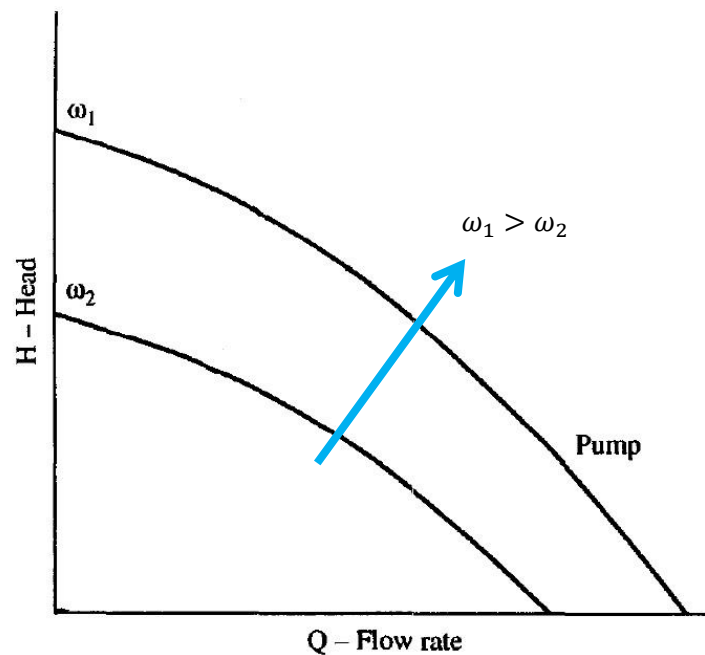


Figura 4.16 – Variação da curva P-Q de uma bomba com a variação da velocidade de rotação (adaptado de [9]).

As curvas referidas são disponibilizadas pelo fabricante de cada bomba centrífuga, a partir da análise de diferentes pontos de funcionamento de cada bomba. Sendo assim, cada curva apresentada pelo fabricante corresponde a um determinado modelo de bomba.

Capítulo 5 - Resultados experimentais

Neste capítulo procede-se à aquisição e respectiva análise dos resultados experimentais obtidos. Inicialmente descreve-se o sistema utilizado para analisar as características do sistema de produção e armazenamento de energia abordado nesta dissertação. Aborda-se mais em detalhe os sensores utilizados na aquisição de sinais.

Depois de descrito o sistema e os procedimentos experimentais utilizados, discutem-se os resultados obtidos.

5.1 – Instalação experimental do sistema de produção e armazenamento pico-hídrico

Com o objectivo de avaliar experimentalmente o desempenho do sistema de produção e armazenamento de energia proposto desenvolveu-se um modelo experimental que pretende simular, de forma controlada, um esquema típico pico-hídrico, com bombagem.

Este modelo experimental, cujo esquemático se apresenta na Figura 5.1, tem como principais constituintes um reservatório de água, uma turbina de impulso do tipo *Pelton*, um motor universal, de corrente contínua, funcionando como gerador, uma bomba centrífuga e toda a canalização necessária à interligação dos equipamentos referidos.

De forma a avaliar o desempenho do sistema, e dos seus principais constituintes, foram ainda instalados vários sensores e uma válvula de regulação de caudal que permite variar o caudal que circula ao longo da canalização.

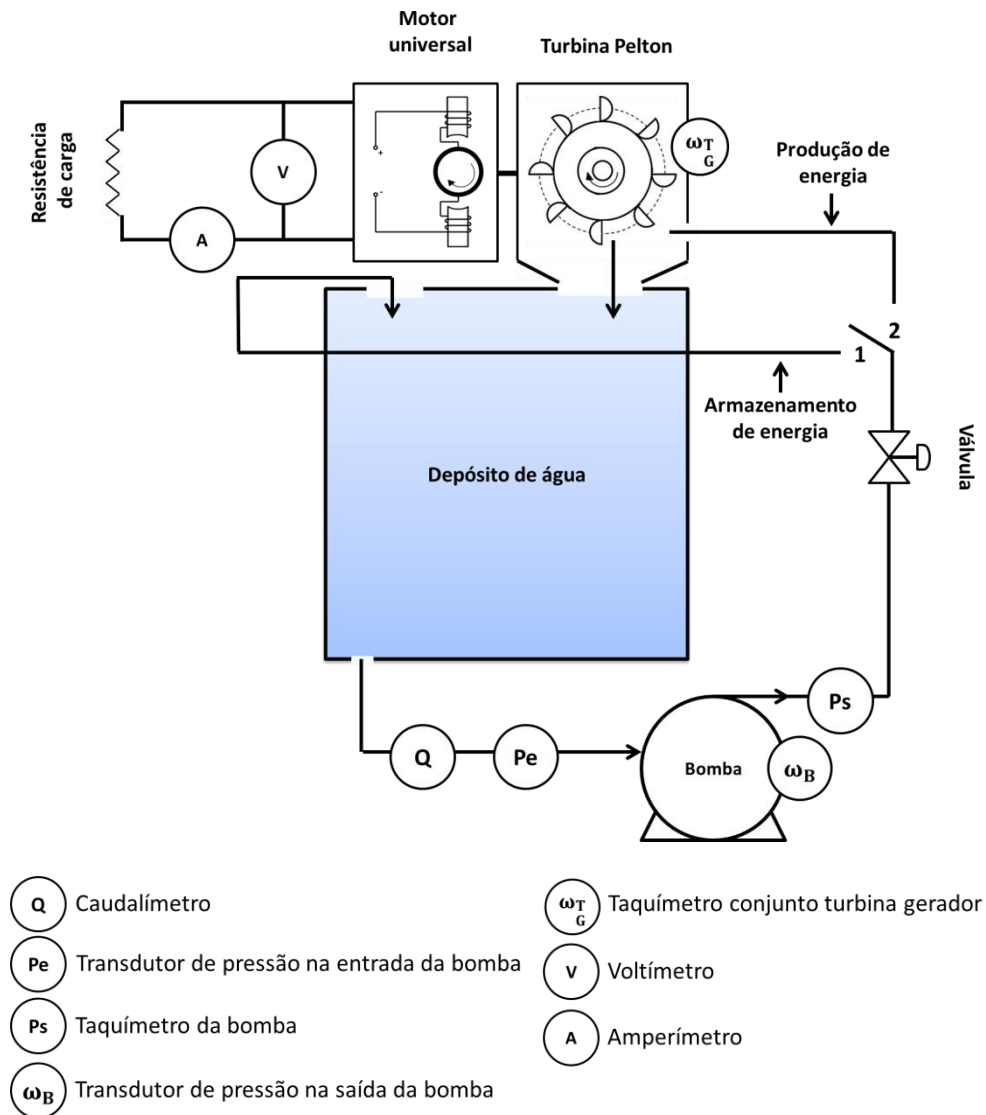


Figura 5.1 - Esquemático do modelo experimental de produção e armazenamento de energia pico-hídrica.

Fazendo uma analogia entre a instalação utilizada na aquisição de resultados práticos e o sistema teórico proposto no capítulo 3, pode observar-se, pelo esquema da Figura 5.1, que a instalação permite o estudo dos sistemas de armazenamento e produção de energia em separado, consoante o sentido do circuito hidráulico montado.

Para analisar o sistema de armazenamento de energia o esquema hidráulico deverá seguir o sentido 1, indicado na Figura 5.1. Assim, a água que sai da parte inferior do depósito flui através do caudalímetro Q e de um transdutor de pressão P_e , e entra na bomba que roda à velocidade ω_B . A bomba centrífuga aumenta a energia potencial de pressão da água, na sua saída, onde se encontra o transdutor de pressão P_s . Depois de passar pela válvula a água

retorna à parte superior do depósito permitindo assim analisar a capacidade de armazenamento da bomba. Ao ser accionada, a válvula, permite variar o fluxo de água que circula através do circuito de armazenamento.

Seguindo o sentido 2 do circuito hidráulico é possível analisar o sistema de produção de energia pico-hídrica. Aqui a água armazenada no depósito é bombeada pela bomba centrífuga até à turbina *Pelton* que se encontra acoplada a um motor universal.

Mais detalhadamente, a água que sai do depósito percorre o circuito hidráulico até ao injector da turbina, que transfere a energia cinética do jacto de água para o seu eixo, fazendo girar o conjunto turbina-gerador, com uma velocidade medida pelo taquímetro ω_{TG} . Ao girar, o veio que acopla a turbina ao motor, faz variar a intensidade do campo magnético, induzindo tensão nos terminais dos seus enrolamentos, e produzindo energia eléctrica. A energia produzida é medida recorrendo ao voltímetro V e ao amperímetro A , posicionados na carga do gerador. A água que cai da turbina retorna ao depósito e entra de novo no circuito hidráulico.

Nesta situação, a bomba em conjunto com a válvula são utilizadas para simular diferentes cotas, que se traduzem em diferentes caudais de admissão da turbina.

A instalação experimental do sistema de testes descrita acima, e utilizada em laboratório, apresenta-se na Figura 5.2.

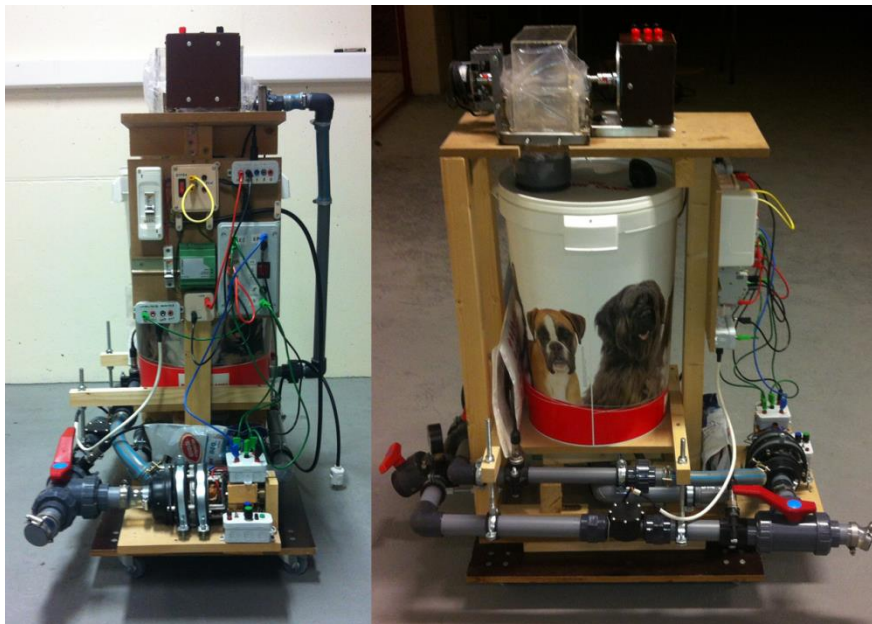


Figura 5.2 - Instalação experimental do sistema pico-hídrico

Ao longo do sistema descrito foram instalados vários sensores, a fim de caracterizar o desempenho dos seus principais constituintes: a turbina, o gerador e a bomba centrífuga. Observando a Figura 5.1, o sensor Q representa o caudalímetro, *SEN02142B*, utilizado para medir a fluxo de água que se desloca ao longo do circuito hidráulico. Os transdutores de pressão, *PDCR 800 Series*, P_e e P_s , posicionados na entrada e saída da bomba, medem a pressão na sua entrada e saída, respectivamente. O taquímetro ω_B mede a velocidade de rotação da bomba centrífuga. A velocidade do grupo turbina-gerador é medida pelo taquímetro, *Xinya Increment Rotary Encoder A52S-8-1000-3-F-30*, $\omega_{T.G}$.

5.1.1 - Caudalímetro

O caudalímetro *SEN02142B* utilizado é constituído por uma pequena turbina de plástico, como mostra a Figura 5.3 a), e por um sensor de efeito de *Hall*. Quando a água flui através do sensor a turbina gira de acordo com a taxa de fluxo que a atravessa. À medida que a turbina roda, o sensor de efeito de *Hall* emite um sinal de pulsos que permite descobrir o caudal que atravessa o sensor. Segundo o fabricante, a relação entre a frequência do sinal de pulsos e o caudal de saída em $Lmin^{-1}$ é:

$$Q = \frac{f}{K},$$

onde f representa a frequência dos pulsos e K um coeficiente que depende da vazão e viscosidade do fluido, que é obtido por calibração do sensor.

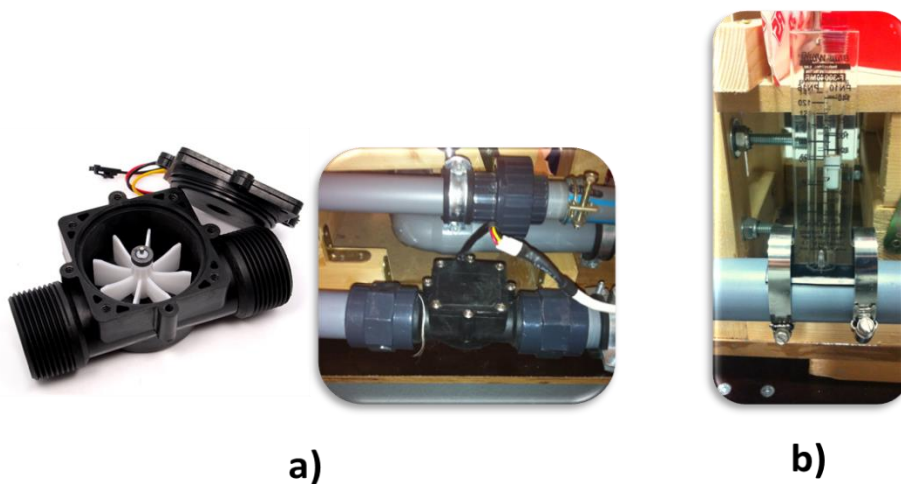


Figura 5.3 - a) Caudalímetro digital utilizado na instalação. b) Caudalímetro analógico utilizado na instalação.

A calibração deste sensor efectuou-se recorrendo ao auxílio de um caudalímetro analógico (ver Figura 5.3 b)) instalado no circuito hidráulico. Comparando o resultado do caudalímetro analógico com a frequência do sinal de pulsos obtida, para um determinado caudal, verificou-se que o coeficiente de ajuste K correspondia ao valor de 0,58.

5.1.2 – Transdutores de pressão

Os transdutores de pressão, *PDCR 800 Series*, utilizados (ver Figura 5.4) convertem a pressão mecânica exercida pelo fluido, num valor de resistência eléctrica, que por sua vez, é medida através do respectivo valor de tensão que atravessa essa resistência. A pressão feita pelo fluido acciona um potenciómetro fazendo variar a sua resistência.



Figura 5.4 - Transdutores de pressão utilizados na instalação.

A calibração destes transdutores procedeu-se analisando as pressões esperadas com o sistema em repouso, e comparando os resultados esperados com os obtidos através do sensor. Desta análise resultou que o valor de tensão devolvido pelo transdutor posicionado na entrada da bomba tem um *offset* de 0,2 mV em relação ao valor real e o transdutor da saída da bomba possui um *offset* de 1,9 mV.

Consultando o *datasheet* dos transdutores de pressão, verifica-se que o sensor varia linearmente dentro da gama de valores a medir, e que 5mV correspondem a 0,35 bar. Sendo assim, conclui-se que o valor de tensão devolvido pelos sensores pode ser convertido no correspondente valor de pressão, em bar, pela (5.1.

$$P_{bar} = \frac{Valor_lido \times 0,035}{0,05} \quad (5.1)$$

Valor_lido corresponde ao valor de tensão devolvido pelo sensor em *volt*.

5.1.3 – Taquímetro da bomba centrífuga

O taquímetro utilizado para medir a velocidade da bomba é constituído por dois circuitos electrónicos, que em conjunto formam um par emissor-receptor de radiação infravermelha. O circuito emissor é composto por um LED infravermelho em série com um potenciómetro, e o circuito receptor por um fototransístor na montagem colector comum, com um potenciómetro em série com o seu colector, como se representa na Figura 5.5. Os potenciómetros devem ser regulados de acordo com o valor de tensão pretendida na saída e tendo em conta que o LED necessita de um determinado valor de corrente que o permita manter-se ligado (10 – 20mA).

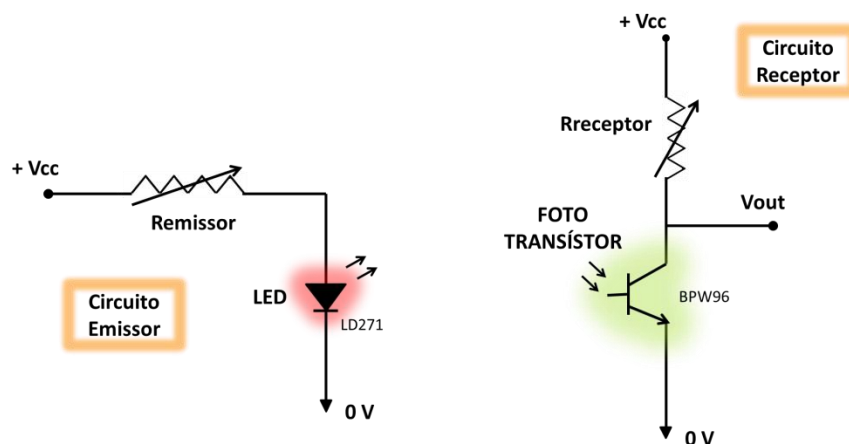


Figura 5.5 - Circuito eléctrico do taquímetro da bomba.

Além do circuito electrónico, o taquímetro é ainda constituído por um disco acoplado ao veio do motor da bomba, apresentado na Figura 5.6. Pela figura pode observar-se que o disco é constituído por duas janelas radiais e pelo circuito emissor-receptor de infravermelhos.

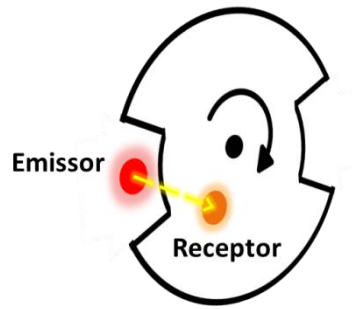


Figura 5.6 – Disco do taquímetro da bomba centrífuga.

À medida que o disco gira à velocidade da bomba, permite que o fototransístor seja alimentado pelo LED, sempre que aparece uma janela. Sempre que o LED e o fototransístor se cruzam o segundo emite um pulso eléctrico. É a frequência dos pulsos eléctricos emitidos no colector do fototransístor (na saída V_{out}) que permite determinar a velocidade de rotação da bomba, através da equação (5.2).

$$\omega_{RPM} = \frac{f}{N_{janelas}} \times 60 \quad (5.2)$$

f representa a frequência do sinal de pulsos emitido pelo sensor, em Hz e $N_{janelas}$ representa o número de janelas radiais do sensor. Neste caso, o sensor possui duas janelas.

5.1.4 – Taquímetro do grupo turbina-gerador

O taquímetro, *Xinya Increment Rotary Encoder A52S-8-1000-3-F-30*, utilizado para medir a velocidade de rotação do grupo turbina-gerador, gera um conjunto de sinais de pulsos cuja análise da frequência permite calcular a velocidade de rotação do seu eixo. Este sensor é constituído no seu interior, por um disco com várias janelas ao longo do seu perímetro radial (ver Figura 5.7 a)). Este disco é iluminado perpendicularmente por um emissor LED, e sempre que este cruza uma janela o fototransístor receptor, posicionado do outro lado do disco, emite um pulso eléctrico (ver Figura 5.7 a)).

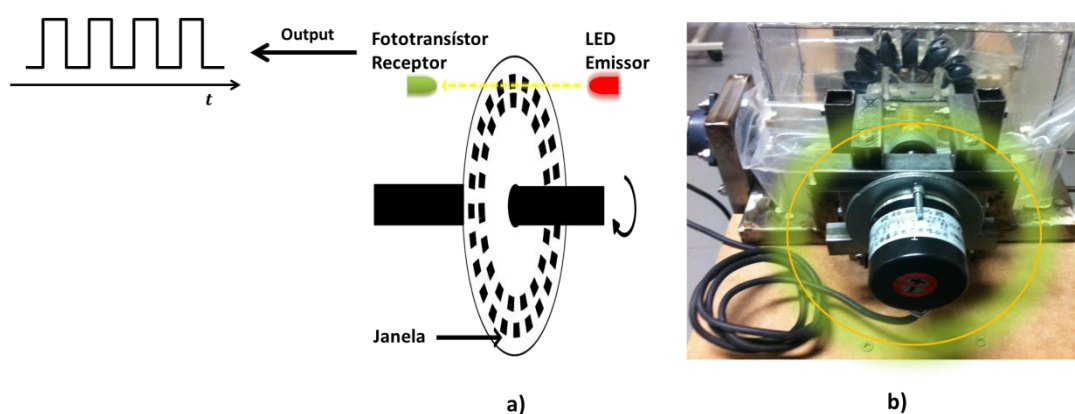


Figura 5.7 – a) Esquema de funcionamento do taquímetro do conjunto turbina-gerador. b) Taquímetro do conjunto turbina-gerador na instalação.

Analisando o sinal de pulsos emitido pelo sensor e sabendo o número de janelas que este possui, é possível determinar a velocidade de rotação do grupo turbina-gerador. Pelo *datasheet* verifica-se que o sensor utilizado tem 1000 janelas radiais, isto significa que em cada volta completa do disco o fototransistor vai emitir 1000 pulsos eléctricos. Sendo assim é possível obter a velocidade de rotação, em rotações por minuto, medida pelo sensor a partir da (5.2, onde $N_{Janelas}$ assume o valor 1000.

O sensor utilizado emite três pulsos de sinais distintos (A,B e Z), no entanto, aqui apenas se analisa um deles, pois apenas se pretende quantificar a velocidade de rotação. Os sinais A e B encontram-se desfasados 90° permitindo verificar o sentido de rotação do sensor, através da sua análise conjunta. O sinal Z indica a referência do taquímetro, ou seja, o início de uma nova volta, e surge apenas uma vez por período.

Na Tabela 5.1 apresenta-se um resumo das principais características dos sensores utilizados na recolha de dados experimentais.

Tabela 5.1 – Tabela resuma das características dos sensores.

Sensor		Alcance	Precisão	Alimentação	Relação saída sensor – valor real
Caudalímetro	Q	1 – 120 $Lmin^{-1}$	3%	5 – 24 V	$Q = \frac{f}{K} (Lmin^{-1})$

Transdutor de pressão na entrada da bomba	P_e	0 – 0,35 <i>bar</i>	0,1%	10 V	$P_{bar} = \frac{Valor_lido \times 0,035}{0,05}$ (bar)
Transdutor de pressão na saída da bomba	P_s				
Taquímetro da bomba	ω_B	6000 <i>rpm</i>	2 pulsos /revolução	5 V	$\omega_{RPM} = \frac{f}{N_{janelas}} \times 60$ (rpm)
Taquímetro do grupo turbina-gerador	ω_{TG}	5000 <i>rpm</i>	1000 pulsos /revolução	8 – 30V	

5.1.5 – Aquisição de dados dos sensores

A aquisição de dados da maioria dos sensores efectua-se com o auxílio do Arduino MEGA 2560 (ver Figura 5.8) e alguma lógica adicional. O Arduino é um microcontrolador *open-source* de baixo custo, caracterizado por possuir um *hardware* e *software* bastante simples e acessível.

A vantagem de utilização do Arduino neste projecto advém da sua capacidade de interacção com o meio, permitindo a recepção dos dados dos sensores.



Figura 5.8 - Arduino Mega 2560 (vista de cima). [4]

Existem diversos tipos de Arduino, com diferentes capacidades de processamento e características. O Arduino Mega 2560 possui 54 pins de entrada/saída digitais, dos quais 15 podem ser utilizados como saídas PWM, 16 pins de entrada analógicos, um oscilador de cristal

com uma frequência de 16 MHz, uma ligação USB, uma tomada para alimentação externa, uma entrada ICSP (*In Circuit Serial Programming*) e um botão de *reset*. A placa Arduino contém tudo o que é necessário para suportar o microcontrolador ATmega328, bastando para tal conectá-la a um computador através de um cabo USB, ou liga-lo a um transformador AC-DC, ou a uma bateria para que esta comece a funcionar. [4]

5.2 – Análise experimental do sistema de armazenamento de energia

Depois de descrita a instalação experimental, e abordados os sensores a utilizar na aquisição de dados, aqui efectua-se a análise prática do sistema de armazenamento de energia. Para tal, o circuito hidráulico do esquema, da Figura 5.1, deve ser montado na posição 1, tendo como principais constituintes o depósito de água e a bomba centrífuga.

A água que sai da parte inferior do depósito é bombeada até à sua parte superior, com uma determinada pressão, que representa a altura de elevação da bomba e com determinado caudal que representa a sua capacidade de bombagem. Este caudal pode variar consoante o accionamento da válvula de regulação de caudal.

Comparando o *Setup* experimental com o sistema de armazenamento de energia modelado no capítulo 4, surgem algumas diferenças nomeadamente o facto de, no *Setup*, a água não se deslocar entre dois depósitos, mas sim entre a base e o topo do mesmo depósito. Isto deve-se ao facto de se tentar tornar as dimensões do *Setup* as mais reduzidas possível, mantendo a sua mobilidade. A alimentação da bomba efectua-se através da rede eléctrica, posteriormente seria interessante integrar ao *Setup* uma fonte renovável de forma a avaliar os seus impactos no sistema e a garantir o funcionamento autónomo do sistema e independente da rede eléctrica.

Para caracterizar o sistema de armazenamento, efectua-se inicialmente a caracterização da bomba centrífuga, através da determinação da sua curva P-Q, e em seguida determina-se a sua eficiência, a partir do cálculo da potência hidráulica.

O procedimento efectuado na recolha dos dados experimentais do sistema de bombagem apresenta-se no fluxograma da Figura 5.9.

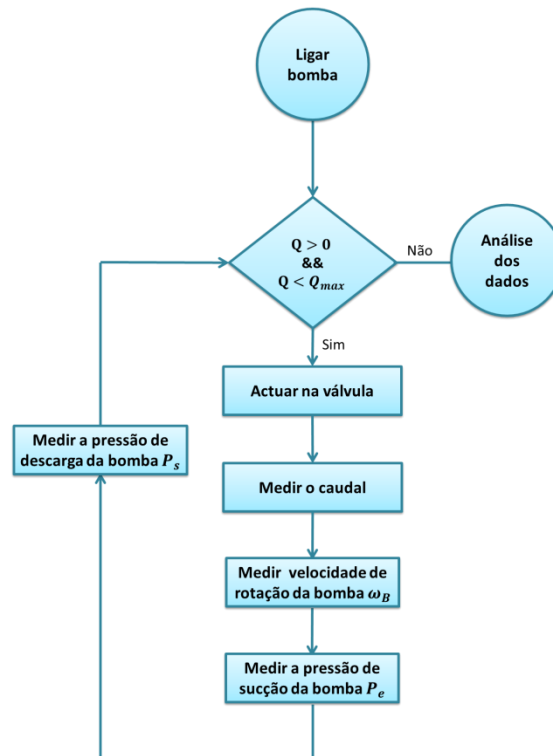


Figura 5.9 – Esquema simplificado da recolha dos dados experimentais do sistema de bombagem.

Depois de colocada a bomba em funcionamento, abre-se parcialmente a válvula, obtendo-se um determinado caudal, medido pelo caudalímetro Q . Em seguida mede-se a velocidade de rotação da bomba com o taquímetro ω_B e mede-se também a pressão desenvolvida pela bomba. Esta pressão representa a altura manométrica desenvolvida pela bomba, que é igual à diferença de pressões entre a saída (descarga) P_s e entrada (sucção) P_e da bomba.

Continuando este processo algumas vezes, fazendo variar o caudal entre zero e o seu valor máximo, obtêm-se outros pontos de funcionamento da bomba centrífuga.

Depois de recolhidos os dados verificou-se que a velocidade de rotação da bomba variava linearmente com o caudal. Como se pode observar na Figura 5.10, a velocidade de rotação aumenta com a diminuição do caudal e com o consequente aumento da altura manométrica.

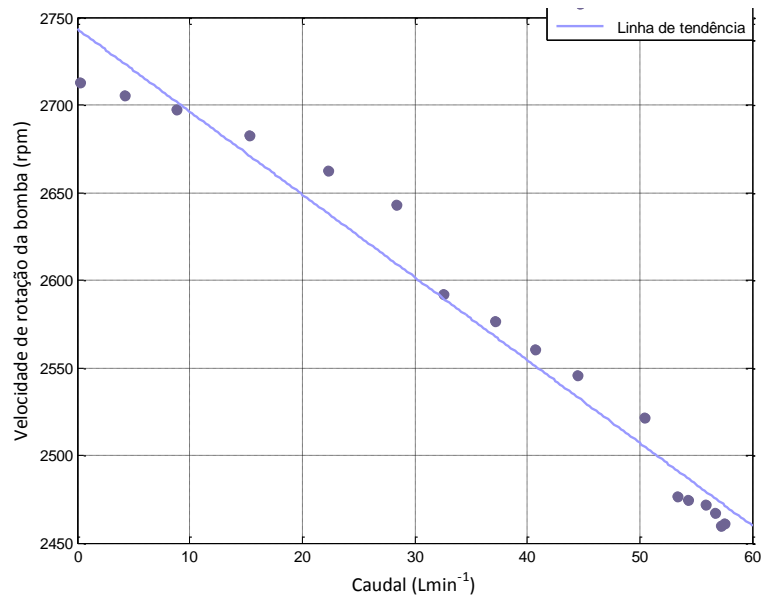


Figura 5.10 – Variação da velocidade de rotação da bomba com o caudal.

Como as curvas características das bombas centrífugas são sensíveis às variações do diâmetro, da rotação e da forma do rotor, basta que uma dessas grandezas se altere para que a curva característica se modifique. A aplicação das leis de afinidade das bombas centrífugas, para uma velocidade de rotação variável, apresentadas na (5.3), permite neste caso corrigir os valores de pressão e caudal medidos, para os correspondentes a um valor de velocidade de rotação constante.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (5.3)$$

Depois de tratados os dados recolhidos é possível observar na Figura 5.11 a curva P-Q característica da bomba centrífuga do sistema, para valores de velocidade de rotação constantes. No eixo das abscissas surgem os valores de caudal medidos, em $Lmin^{-1}$ e no eixo das ordenadas os valores de pressão desenvolvidos, em *mca*.

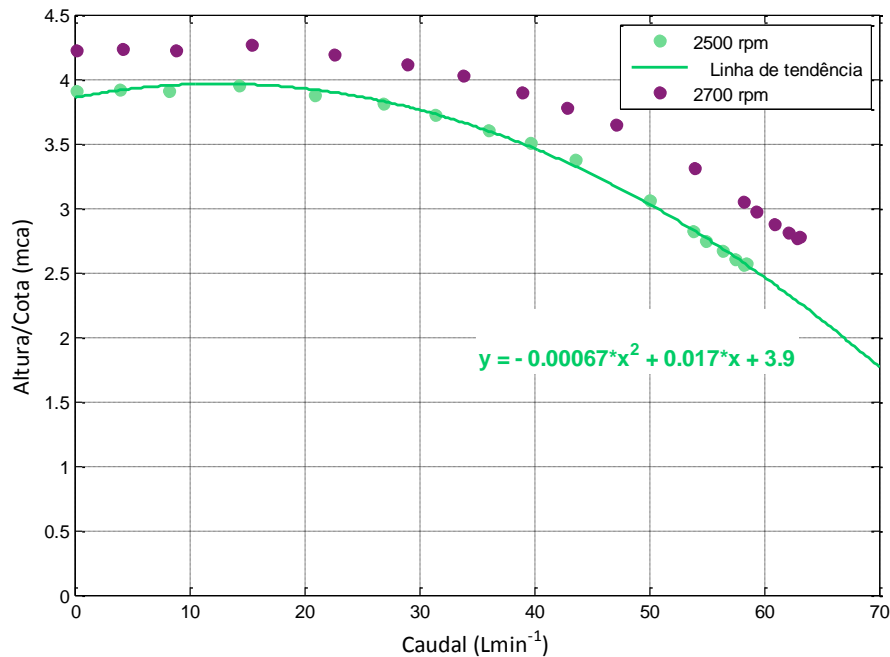


Figura 5.11 – Curva P-Q da bomba centrífuga utilizada no Setup experimental

Observando a Figura 5.11 verifica-se que o caudal apresenta uma relação quadrática com a altura de elevação. Para uma velocidade de rotação constante, a bomba apresenta uma curva estável e à medida que o caudal diminui a altura manométrica aumenta continuamente. Isto significa que quanto menor for o caudal maior será a capacidade de elevação da bomba, como esperado teoricamente.

Com a diminuição da velocidade de rotação verifica-se, para o mesmo valor de caudal, uma diminuição da altura manométrica. Logo para um determinado caudal, quanto menor for a velocidade de rotação da bomba menor será a sua capacidade de elevação.

Comparando a curva P-Q da Figura 5.11, com a curva teórica da Figura 4.15, verifica-se que ambas possuem um andamento semelhante, levando a concluir que os resultados obtidos se encontram dentro do esperado, face aos modelos teóricos. Para uma velocidade constante de 2500 *rpm*, a bomba utilizada no modelo experimental, é capaz de elevar um caudal de $20Lmin^{-1}$ cerca de 4 metros de altura.

Para caracterizar a eficiência do sistema de bombagem mediu-se ainda a tensão e a corrente da rede eléctrica que alimentava a bomba, de forma a se poder calcular a potência absorvida pela bomba, e posteriormente se relacionar com potência entregue à água.

É possível determinar-se o valor da potência entregue à água pela fórmula da potência hidráulica apresentada na (3.1.

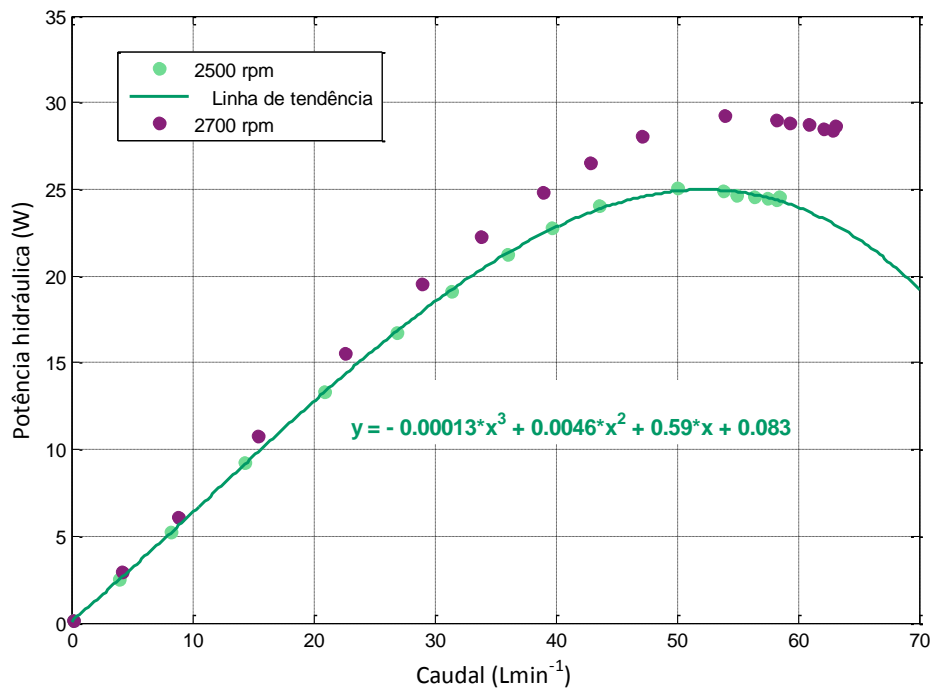


Figura 5.12 – Potência hidráulica da bomba centrífuga utilizada no Setup experimental

Na Figura 5.12 pode verificar-se que, para uma velocidade de rotação constante, a potência hidráulica aumenta com o caudal até determinado ponto, onde atinge um valor de potência máxima. Isto significa que o aumento de caudal leva a um aumento da potência entregue à água até um ponto ótimo. A partir daí a diferença de potencial necessária para elevar a água é tão grande que leva a bomba a uma situação de sobrecarga, diminuindo a potência que ela é capaz de impor à água.

Pela análise da Figura 5.12, pode verificar-se que o caudal e a potência hidráulica desenvolvida pela bomba se relacionam através de uma proporção cúbica. Verifica-se também que o aumento da velocidade de rotação permite aumentar o valor da potência hidráulica. Isto significa que, para o mesmo valor de caudal, se pretender aumentar a potência entregue ao fluido deverá aumentar-se a velocidade de rotação da bomba. O aumento da potência hidráulica traduz-se num aumento da pressão diferencial nos terminais da bomba, aumentando a sua capacidade de elevação.

A eficiência do sistema de bombagem, apresentada na Figura 5.13, resulta do quociente entre a potência hidráulica na saída da bomba e a potência absorvida na entrada da

bomba. A potência absorvida pela bomba resulta da multiplicação entre a tensão e a corrente na entrada da bomba, medidas através de multímetros, colocados em paralelo e em série com esta.

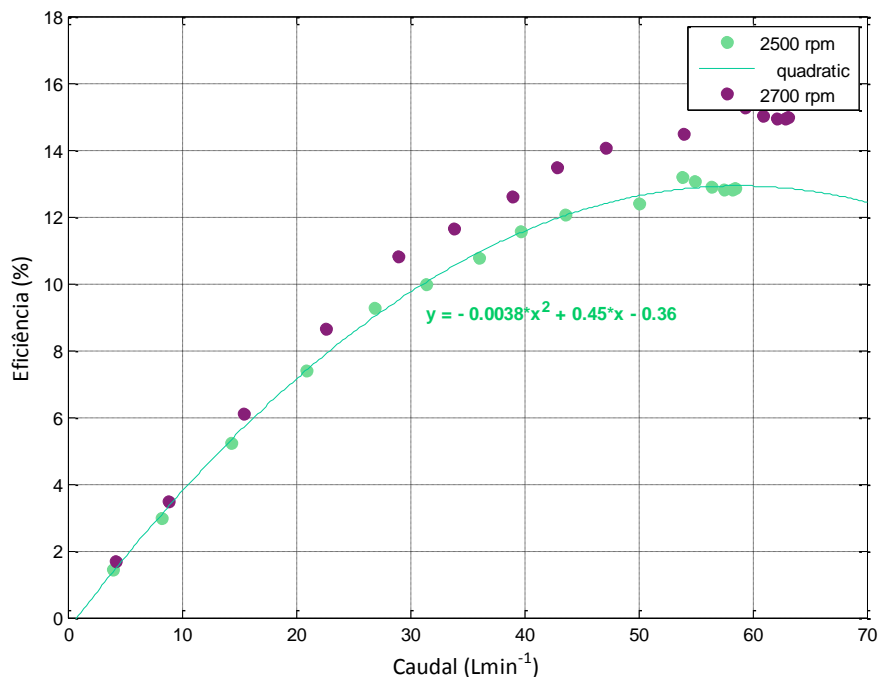


Figura 5.13 – Eficiência da bomba centrífuga utilizada no Setup experimental

Analisando a Figura 5.13 conclui-se que, para uma velocidade de rotação constante, a eficiência aumenta com o caudal até um valor denominado caudal ótimo, que possui a potência máxima que se consegue atingir, no sistema hidráulico em estudo. Aumentando a rotação da bomba, para um valor de caudal constante, é possível aumentar a eficiência. Isto deve-se ao facto de o aumento de rotação levar a um aumento da capacidade de elevação da bomba, como referido anteriormente.

Os valores de eficiência obtidos são reduzidos, no entanto encontram-se dentro do esperado. Isto porque, a bomba utilizada, no esquema experimental, foi reaproveitada de uma máquina de lavar roupa, cujos valores de eficiência típicos esperados andam próximos dos 20%.

Comparando os resultados práticos obtidos com os resultados esperados teoricamente, verifica-se que o comportamento das curvas obtidas está próximo do esperado. Pode concluir-se que o sistema de bombagem estudado consegue elevar uma gama de caudais

relativamente reduzida (aproximadamente 60 Lmin^{-1}) e possui valores de eficiência reduzidos.

5.3 – Análise experimental do sistema de produção energia

Aqui procede-se à análise prática do sistema de produção de energia eléctrica. Para tal o circuito hidráulico do esquema da Figura 5.1 deverá ser montado na posição 2, tendo como principais constituintes a turbina *Pelton*, com um diâmetro nominal de aproximadamente 8 cm, e o motor universal (ver Figura 5.14).

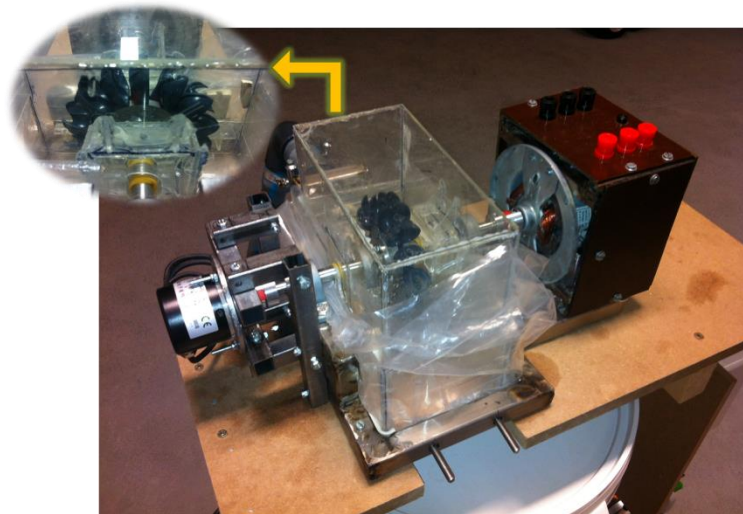


Figura 5.14 – Turbina *Pelton* acoplada ao motor universal, funcionando como gerador, utilizados no *Setup* experimental.

A água que sai da parte inferior depósito é bombeada até à turbina com um determinado caudal. O caudal ejetado na turbina incide nas suas pás fazendo girar o seu eixo. Ao girar o eixo da turbina que se encontra directamente acoplado ao gerador permite a produção de energia que é medida na carga resistiva.

Comparando com o sistema de armazenamento de energia modelado no capítulo 4, o sistema prático apresenta algumas diferenças, nomeadamente o facto de o jacto de água não advir da queda entre um depósito superior e a turbina. Aqui é utilizado o sistema de bombagem referido no sub-capítulo 5.2, para fazer variar o caudal de admissão da turbina, simulando diferentes alturas através do accionamento da válvula. Este caudal pode variar consoante o accionamento da válvula de regulação de caudal.

Para caracterizar o sistema de produção de energia, analisam-se as curvas de eficiência fazendo variar o caudal de admissão da turbina e a carga resistiva, posicionada em paralelo com os terminais do gerador.

O procedimento efectuado para a recolha dos dados experimentais do sistema de produção de energia pico-hídrica apresenta-se no fluxograma da Figura 5.15.

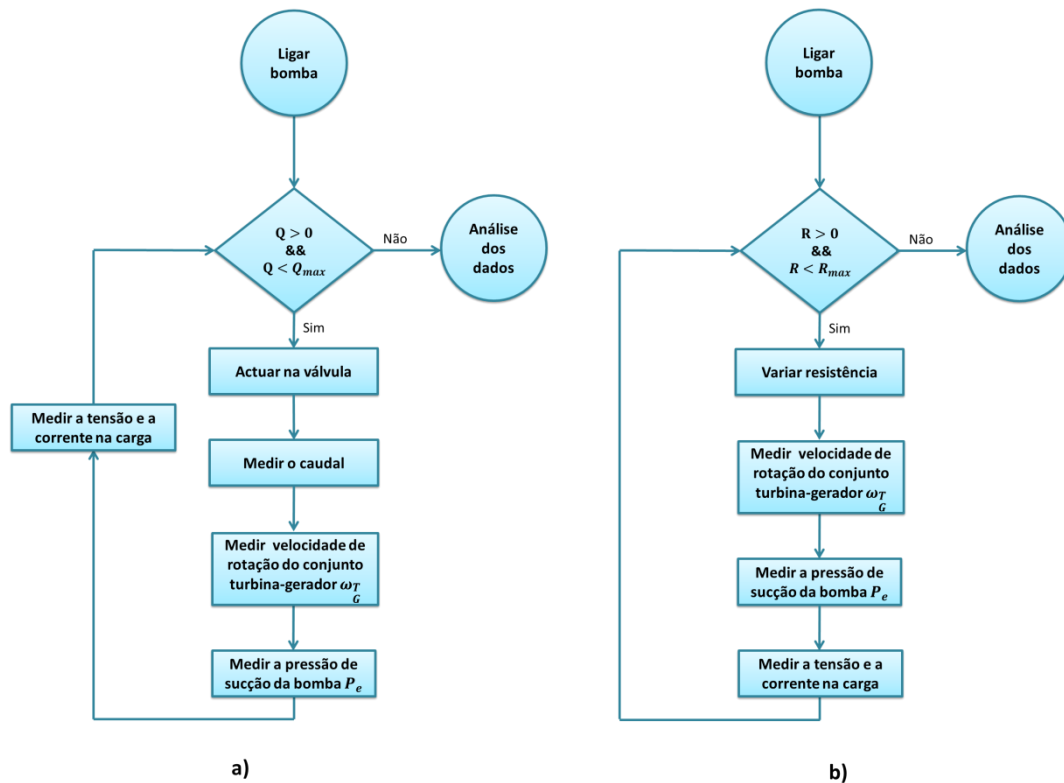


Figura 5.15 – Esquema simplificado da recolha dos dados experimentais do sistema de bombagem.

No que diz respeito à recolha de dados experimentais, podem destacar-se dois ensaios. Um onde se mantém a resistência de carga constante e se faz variar o caudal de admissão da turbina (ver Figura 5.15 a)), e outro onde o caudal é mantido constante e se varia a resistência de carga do sistema (ver Figura 5.15 b)).

Na primeira situação, depois de colocada a bomba em funcionamento e posicionando a resistência de carga num valor constante, abre-se parcialmente a válvula de regulação de caudal, obtendo-se um determinado caudal de admissão, medido pelo caudalímetro Q . Em seguida mede-se a velocidade de rotação do conjunto turbina-gerador ω_{TG} e mede-se também a tensão e a corrente na carga, a fim de se poder quantificar a energia produzida. A velocidade de rotação efectua-se medindo a frequência de pulsos devolvidos pelo sensor com auxílio a

um osciloscópio, os valores de tensão e corrente que atravessam a resistência de carga são medidos com multímetros.

Continuando este processo algumas vezes, fazendo variar o caudal entre zero e o seu valor máximo, obtêm-se vários pontos de funcionamento do conjunto turbina-gerador.

Na segunda situação, os procedimentos são semelhantes, com a diferença que aqui é mantido um valor de caudal constante e se faz variar o valor da resistência de carga, entre o seu valor máximo e mínimo.

Depois de recolhidos os dados analisa-se o desempenho do sistema através da análise de diferentes curvas características do sistema. Inicialmente fez-se variar o caudal seguindo os procedimentos da Figura 5.15 a), mantendo o valor de resistência de carga em $5,5 \Omega$. Depois mantendo o caudal constante no seu valor máximo, variou-se a resistência de carga, seguindo os procedimentos da Figura 5.15 b).

No arranque do motor universal recorreu-se ao uso de uma fonte de tensão externa, colocada em série com o enrolamento de campo, e por sua vez em série com a armadura. Assim, quando a fonte de tensão externa é ligada, é induzida uma corrente nos enrolamentos do campo e na armadura que permite o arranque do gerador.

Na Figura 5.16 verifica-se como a velocidade de rotação do conjunto turbina-gerador, em rpm, varia com o caudal, em $Lmin^{-1}$.

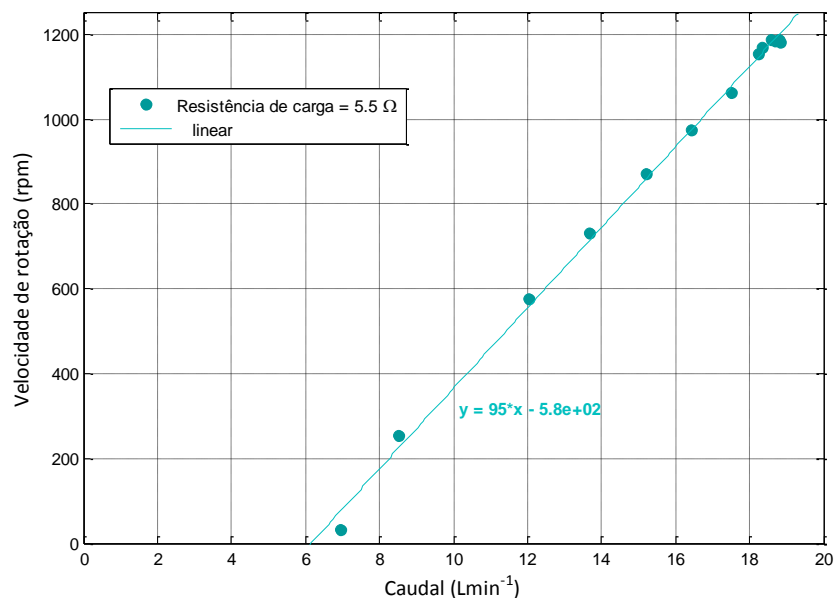


Figura 5.16 – Velocidade de rotação do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de resistência constante.

Pela análise da Figura 5.16 verifica-se que, dentro da gama de caudais testados, a velocidade de rotação do grupo turbina-gerador aumenta com o aumento do caudal de admissão da turbina. Para valores reduzidos de caudal, neste caso, inferiores a 7 Lmin^{-1} , a velocidade de rotação é muito reduzida e até inexistente pois o caudal deixa de ter força suficiente para fazer girar as pás da turbina. Quanto menor for a velocidade de rotação, menor será a energia produzida na carga. Como se pode observar na Figura 5.17, quanto menor for o caudal menor será a potência na carga resistiva.

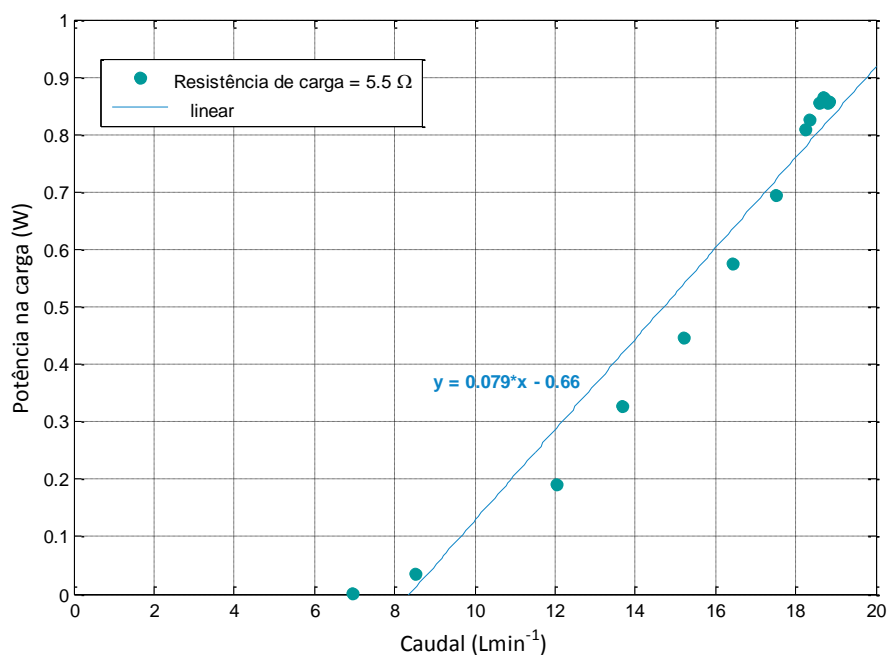


Figura 5.17 – Potência na carga resistiva do grupo turbina-gerador pico-hídrico, para um valor de resistência constante.

Observando a Figura 5.17 verifica-se que o valor de potência que se consegue entregar à carga é bastante reduzido, isto deve-se ao facto de se ter utilizado como gerador um motor universal, reaproveitado de outro sistema e que por isso já se encontra um pouco desgastado. E ainda ao facto de ser utilizada uma gama de caudal bastante reduzida.

A eficiência do grupo turbina-gerador obtém-se pelo quociente entre a potência na carga e a potência associada ao jacto de água que incide nas pás da turbina. A potência do jacto de água determina-se pela (4.18).

Na Figura 5.18 apresenta-se o comportamento da curva de eficiência do grupo turbina-gerador, com a variação do caudal de admissão.

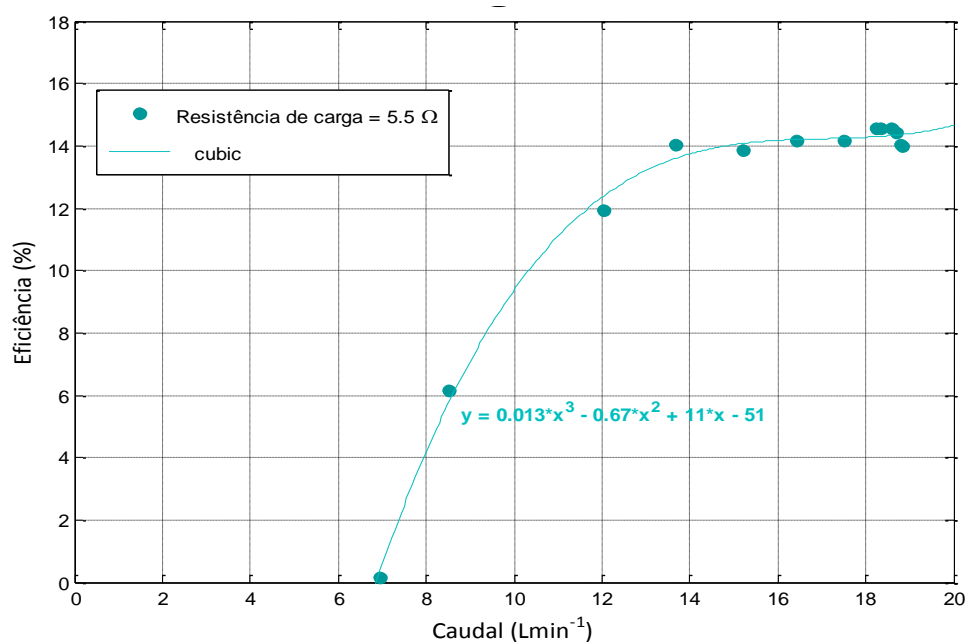


Figura 5.18 – Eficiência do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de resistência constante.

Na Figura 5.18 apresenta-se uma curva plana para a gama de caudais testados. Para caudais mais reduzidos a eficiência diminui, chegando a ser nula, nos casos em que o caudal de admissão não é suficiente para fazer girar as pás da turbina. Pode dizer-se que o sistema apresenta um bom desempenho em diversas condições de operação, no entanto o valor máximo de eficiência obtido é inferior ao esperado. Isto deve-se ao facto de o motor universal utilizado não se encontrar nas melhores condições induzindo perdas significativas no sistema.

Futuramente seria interessante excitar a turbina com uma gama maior de caudais, isto seria possível trocando a bomba utilizada no *Setup* por uma de potência superior, ou colocando outra bomba em paralelo, para se aumentar o caudal que circula no circuito hidráulico.

As curvas obtidas com a variação do caudal de admissão da turbina, para um valor de resistência constante, apresentam o mesmo andamento que as curvas simuladas, levando a concluir que o sistema, apesar de menos eficiência se comporta como era esperado.

Em seguida fez-se variar a resistência de carga, mantendo o caudal de admissão constante, com a válvula de regulação de caudal totalmente aberta, e fez-se uma análise semelhante à efectuada quando se fez variar o caudal.

Na Figura 5.19 apresenta-se a curva de potência na carga, em W , quando se variou a resistência de carga entre, aproximadamente, 0 e 200 Ω .

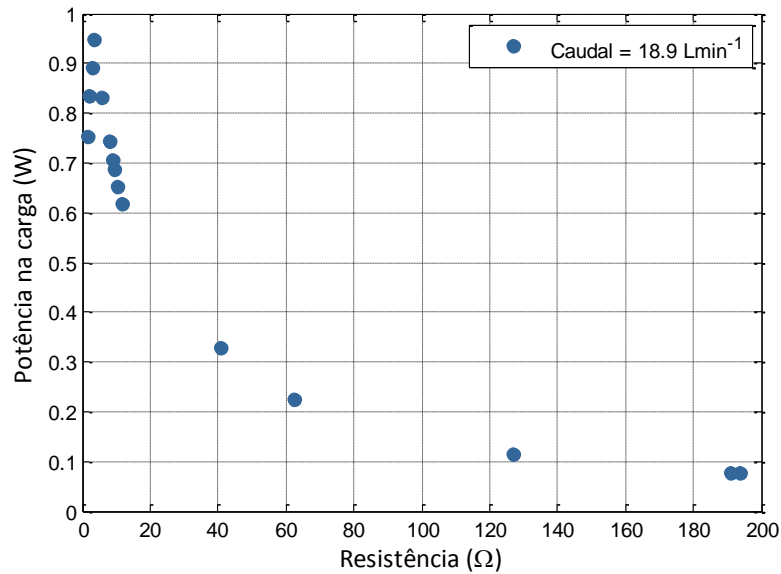


Figura 5.19 – Potência na carga resistiva do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de caudal constante.

Observando a Figura 5.19 verifica-se que a potência aumenta para valores de resistência mais reduzidos e depois começa a diminuir com o aumento da resistência. Pode concluir-se que existe um valor de resistência óptimo, no entanto, a carga não vai ser controlada uma vez que na prática esta representa a carga eléctrica de um edifício. Seria interessante integrar alguma electrónica de potência nos terminais do gerador de forma a extrair sempre a sua potência máxima disponível.

O comportamento da curva de eficiência do sistema de produção de energia com a variação da resistência de carga obtém-se da mesma forma que foi descrita na situação em que varia o caudal. Na Figura 5.20 apresenta-se o andamento da curva de eficiência com a variação da carga resistiva.

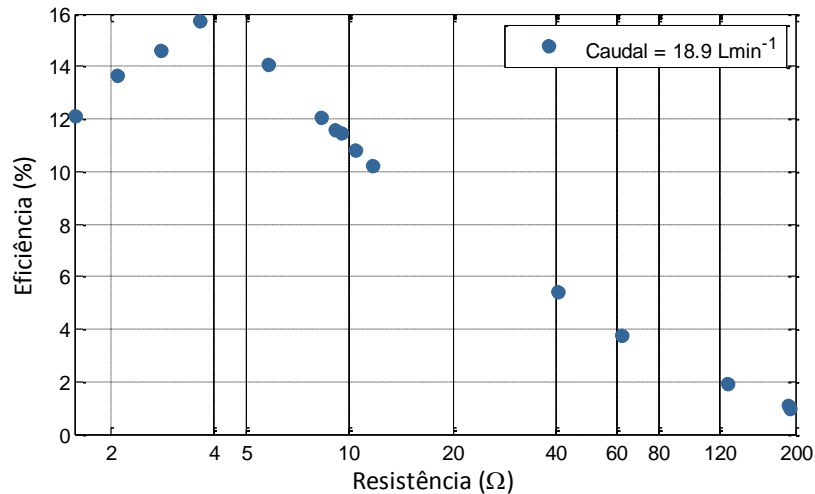


Figura 5.20 – Eficiência do grupo turbina-gerador pico-hídrico utilizado no Setup experimental, para um valor de caudal constante.

Pela análise da Figura 5.20 verifica-se, à semelhança da Figura 5.19, que a eficiência aumenta até determinado valor de resistência e depois diminui para valores de resistência superiores. Isto significa que valores de resistência elevados levam a perdas de potência na carga do sistema. Os valores reduzidos da eficiência máxima obtida prendem-se com o facto já referido de o gerador utilizado ter perdas bastante significativas.

Comparando os resultados obtidos, ao fazer variar a resistência de carga, com os obtidos em simulação verifica-se que o andamento das curvas é semelhante, no entanto os valores de potência na carga e eficiência do sistema ficam aquém das expectativas.

Capítulo 6 - Conclusões e Trabalho futuro

Nesta dissertação foi simulado e ensaiado laboratorialmente o protótipo de um sistema de produção e armazenamento de energia pico-hídrica, integrado em edifícios. Terminado o desenvolvimento do trabalho, torna-se necessário apresentar as conclusões retiradas, e ainda prever o trabalho futuro a desenvolver, no sentido de otimizar o sistema proposto.

6.1 - Conclusões

Pelos resultados obtidos, tanto em simulação como em laboratório, é possível concluir que o sistema de armazenamento e produção pico-hídrica de energia apresentado é viável apenas em regiões sub-desenvolvidas, onde a rede eléctrica se encontra inacessível. Nos países desenvolvidos os resultados obtidos demonstram que este sistema não é suficientemente competitivo para se impor.

Os resultados experimentais apresentam algumas discrepâncias em relação aos simulados, uma vez que além dos componentes utilizados na implementação não serem os de simulação, o fluxo de água obtido é bastante inferior ao previsto no sistema simulado.

É interessante evidenciar que o sistema desenvolvido utiliza componentes acessíveis mesmo aos países menos desenvolvidos e que podem ser reaproveitados de outros sistemas, como sistemas de irrigação e bombagem de água. No entanto, deve ter-se em mente que a selecção e o dimensionamento do equipamento utilizado faz variar os resultados alcançáveis. Para otimizar o rendimento do sistema de armazenamento e produção pico-hídrica, deverá fazer-se um dimensionamento e escolher o material mais adequado.

O sistema desenvolvido não se revelou um sistema competitivo com o actual mercado energético dos países desenvolvidos. Apresenta a vantagem de ser completamente renovável, no entanto a sua capacidade de produção é mínima quando comparada com os consumos energéticos de um edifício dos países desenvolvidos. Hoje em dia, os 700 W de potência máxima prevista produzir, num edifício com 20 metros de altura, são claramente insuficientes face às necessidades energéticas e ao elevado consumo de electricidade que se verifica nos edifícios. Sendo assim, pode concluir-se que a aplicação do sistema abordado nesta dissertação é inviável para as condições que foi proposto.

Assim sendo, o sistema utilizado nos ensaios apresenta-se aqui como prova de conceito dos sistemas de produção e armazenamento pico-hídrico. O protótipo concebido permite o estudo em separado, dos sistemas de armazenamento e de produção de energia, sendo ainda possível analisar o desempenho de cada um em conjunto e em separado. O sistema desenvolvido pode ser futuramente utilizado como um sistema didáctico no estudo da produção hídrica.

Por fim conclui-se que, apesar dos resultados práticos ficarem um pouco aquém das expectativas, o andamento das curvas características dos componentes utilizados e dos desempenhos do sistema se encontram de acordo com os resultados esperados e obtidos por simulação.

6.2 - Trabalho futuro

Os resultados obtidos permitem essencialmente provar o conceito de armazenamento de energia, sob a forma de energia potencial da água, e posterior reaproveitamento dessa energia armazenada.

Como trabalho futuro seria relevante integrar uma fonte de energia renovável, como a utilização de painéis solares ou micro turbinas eólicas, para accionar a bomba centrífuga utilizada no sub-sistema de armazenamento de energia, e avaliar o seu impacto no desempenho do sistema. Além disso a integração de uma fonte renovável tornaria o sistema completamente independente da rede eléctrica, garantindo o seu funcionamento autónomo e descentralizado.

No que diz respeito ao sub-sistema de produção de energia pico-hídrica, seria relevante excitar a turbina *Pelton* com valores de caudais superiores aos conseguidos nesta dissertação. Para tal, seria necessário trocar a bomba centrífuga utilizada por uma de potência superior, ou então, colocar outra bomba em paralelo com a instalada permitindo aumentar o caudal bombeado, e assim avaliar o desempenho e a capacidade de produção da turbina com caudais mais próximos dos utilizados em simulação.

Por último, seria igualmente interessante analisar o desempenho do sistema utilizando outro tipo de geradores eléctricos e os impactos económicos que isso acarretaria, visto o gerador ser o componente mais caro do sistema proposto.

Referências Bibliográficas

- [1] European Commission. *World energy, technology and climate policy outlook 2030: WETO*. Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [2] Comissão Europeia. *Crescimento sustentável*, Novembro 2012.
- [3] Direcção Geral de Energia e Geologia. *Balanço energético sintético*, 2011.
- [4] Arduino Company. *www.arduino.cc* . Acessado em Março de 2013.
- [5] Peter Dondi, Deia Bayoumi, Christoph Haederli, Danny Julian, and Marco Suter. *Network integration of distributed power generation*. Journal of Power Sources, Vol. 106, NO.12, pp. 1-9, 2002. Proceedings of the Seventh Grove Fuel Cell Symposium.
- [6] Thomas Ackermann, Goran Andersson, and Lennart oder. *Distributed generation: a definition*. Electric Power Systems Research, Vol. 57, NO. 3, pp. 195 - 204, 2001.
- [7] Leda-Ioanna Tegou, Heracles Polatidis, and Dias A Haralambopoulos. *Distributed generation with renewable energy systems: the spatial dimension for an autonomous grid*. In 47th conference of the European Regional Science Association, ERSA. Paris, France, pp. 1731-1744. Citeseer, 2007.
- [8] A. Ipakchi and F. Albuyeh. Grid of the future. *Power and Energy Magazine*, IEEE, Vol. 7, NO. 2, pp.52-62, 2009.
- [9] H. Suehrcke, J. Appelbaum, and B. Breshef. *Modelling a permanent magnet DC motor centrifugal pump assembly in a photovoltaic energy system*. Solar Energy, Vol. 59, NO. 1-3, pp. 37-42, 1997.
- [10] Grundfos Industrial Solution. *Pump Handbook*. Grundfos, March 2004.
- [11] Agência Portuguesa do Ambiente. *Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - SIDS PORTUGAL*. Agência Portuguesa do Ambiente, 2007.
- [12] S.C. Smith, P.K. Sen, B. Kroposki, and K. Malmedal. *Renewable energy and energy storage systems in rural electrical power systems: Issues, challenges and application guidelines*. In Rural Electric Power Conference (REPC), 2010 IEEE, pp. B4-B4-7, 2010.
- [13] European Commission. *Energy 2020 - A strategy for competitive, sustainable and secure energy*. November, 2010.

- [14] Nirmal-Kumar C. Nair, and Niraj Garimella. *Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration*. Energy and Buildings, Vol. 42, NO. 11, pp. 2124 - 2130, 2010.
- [15] European Commission. *2009 Technology map of the European Strategic Energy Technology Plan(SETPlan)*. Publications Office of the European Union, 2009.
- [16] C.N. Rasmussen. *Energy storage for improvement of wind power characteristics*. In PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, pp. 1-8, 2011.
- [17] T.M. Masaud, Keun Lee, and P.K. Sen. *An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future?*. In North American Power Symposium (NAPS), 2010, pp 1-6, 2010.
- [18] Paolo Bertoldi, and Bogdan Atanasiu. *Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged european union*. IES-JRC. European Union, 2007.
- [19] Faizur Rahman, Shafiqur Rehman, and Mohammed Arif Abdul-Majeed. *Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in saudi arabia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, NO. 1, pp. 274 - 283, 2012.
- [20] J.P. Deane, B.P. Ó Gallachóir, and E.J. McKeogh. *Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, NO. 4, pp. 1293 - 1302, 2010.
- [21] Laura Aelenei, Daniel Aelenei, and M.C. da Costa Santos. *Standard unretrofitted buildings and net zero-energy concept*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2010.
- [22] Nigel Smith, and Ghanashyam Ranjitkar. *Nepal case study - part one installation and performance of the pico power pack*. Pico Hydro, 2010.
- [23] M.F. Basar, A. Ahmad, N. Hasim, and K. Sopian. *Introduction to the pico hydro power and the status of implementation in malaysia*. In Research and Development (SCOREd), 2011 IEEE Student Conference on, pp 283-288, 2011.
- [24] Maria G. Carvalhob, Naim H. Afgana, Darwish Al Gobaisib, and Maurizio Cumoc. *Sustainable energy development*.
- [25] Helder Gonçalves. *Towards a strategy to zero energy buildings (zeb) concept*. 2009.

- [26] Xianyi Qian. *Application research of flywheel battery in the wind and solar complementary power generation*. In Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference on, Vol. 13, pp V13-546-V13-550, 2010.
- [27] A. Zahnd, K.H. McKay, and R. Komp. *Renewable energy village power systems for remote and impoverished himalayan villages in nepal*. In Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries, 2006.
- [28] Barragem de Foz Tua. <http://www.engenheiriomaestri.com/2012/03/barragem-de-foz-tua.html>. Acedido em Fevereiro de 2013.
- [29] James B. Rishel. *Water Pumps and Pumping Systems*. McGraw-Hill, March 2002.
- [30] Oliver Paish. *Small hydro power: technology and current status*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, NO. 6, pp. 537-556, 2002.
- [31] Kamaruzzaman Sopian, and Juhari Ab Razak. *Pico hydro: clean power from small streams*. In Proceedings of the 3RD WSEAS International Conference On Energy Planning, Saving, Environmental Education, EPESE, Vol. 9, pp. 414-419, 2009.
- [32] F. Schwartz, R. Pegallapati, and M. Shahidehpour. *Small hydro as green power*. In Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, Vol. 2, pp. 2050-2057, 2005.
- [33] A.A. Williams and R. Simpson. *Pico hydro - reducing technical risks for rural electrification*. Renewable Energy, Vol. 34, NO. 8, pp. 1986 - 1991, 2009. 2007 World Renewable Energy Conference - Pacific Rim Region.
- [34] International Energy Agency and CADDET Centre for Renewable Energy. *Smallscale Hydro Within a Municipal Water Supply System*. CADDET renewable energy technical brochure. CADDET Centre for Renewable Energy, 1998.
- [35] R.K. Saket. *Design, development and reliability evaluation of micro hydro power generation system based on municipal waste water*. In Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada, pp. 1-8, 2008.
- [36] P.Maher. *Community pico hydro in sub-saharan Africa: Case study 1*. The Nottingham Trent University, January 2002.
- [37] P.Maher. *Community pico hydro in sub-saharan Africa: Case study 2*. The Nottingham Trent University, February 2002.

- [38] Judith A Cherni. *The sustainability of renewable energy technology for isolated rural areas*. World, Vol. 3, NO. 4,400, pp. 5-300.
- [39] Gilbert M. Masters. *Renewable and efficient electric power systems*. Wiley- Interscience, 2005.
- [40] Abdelmalek Mokeddem, Abdelhamid Midoun, D. Kadri, Said Hiadsi, and Iftikhar A. Raja. *Performance of a directly-coupled PV water pumping system*. Energy Conversion and Management, Vol. 52, NO. 10, pp. 3089 - 3095, 2011.
- [41] Z.Abidin Firatoglu and Bulent Yesilata. *New approaches on the optimization of directly coupled PV pumping systems*. Solar Energy, Vol. 77, NO. 1, pp. 81 - 93, 2004.
- [42] M.A. Farahat, H.M.B. Metwally, and Ahmed Abd-Elfatah Mohamed. *Optimal choice and design of different topologies of dc-dc converter used in PV systems, at diferent climatic conditions in egypt*. Renewable Energy, Vol. 43, NO. 0, pp. 393 - 402, 2012.
- [43] Thierry Martiré, Christian Glaize, Charles Joubert, and Benoît Rouvière. *A simplified but accurate prevision method for along the sun PV pumping systems*. Solar Energy, Vol. 82, NO. 11, pp. 1009 - 1020, 2008.
- [44] P. Camocardi, P. Battaiotto, and R. Mantz. *Autonomous water pumping system based on wind generation*. In Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, pp. 903-908, 2010.
- [45] G. Caralis, and A. Zervos. *Value of wind energy on the reliability of autonomous power systems*. Renewable Power Generation, IET, Vol. 4, NO. 2, pp. 186-197, 2010.
- [46] Philip Maher, and Nigel Smith. *Pico hydro for village power: A practical manual for schemes up to 5 kw in hilly areas*. Intermediate Technology Publications, May 2001.
- [47] DA Howey. *Axial flux permanent magnet generators for pico-hydropower*. In EWB-UK Research Conference, 2009.
- [48] F. Leach, R.A. Munteanu, I. Vadan, and D. Capatana. *Didactic platform for the study of hybrid wind-hydro power plants*. In Advanced Electromechanical Motion Systems Electric Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on, pp. 1-6, 2009.

- [49] Monjurul Ehsan, Enaiyat Ovy, Kazy Fayeem Shariar, and Shah Muhammad Ferdous. *A novel approach of electrification of the high rise buildings at dhaka city during load shedding hours*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), Vol. 2, NO. 1, pp. 123-130, 2012.
- [50] R. Magureanu, M. Albu, V. Bostan, A.-M. Dumitrescu, M. Pelizza, F. Andreea, G. Dimu, F. Popa, and M. Rotaru. *Optimal operation of francis small hydro turbines with variable flow*. In Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on, pp. 1562-1567, 2008.
- [51] Livi, Celso Pohlmann. *Fundamentos de Fenômenos de Transporte*. LTC, Rio de Janeiro, 2004, pp. 75 -78.
- [52] Syed M.A.A., Ali M.M.N., Hossain F.S., Haque S.A., Siddique A.H.. *Prospect of a Pico Hydro power plant based on irrigation pump in perspective of rural areas in Bangladesh*. Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on , Vol. 1, NO. 6, pp. 15-17, Nov. 2011.
- [52] Castro, Rui. *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica*. Lisboa: Instituto Superior Técnico Press, 1ª edition, 2011.